



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학박사학위논문

**이중차분 반송파 측정치를 활용한
SBAS 전리층 보정정보 정확도
향상에 관한 연구**

**A Study on Improving the Accuracy of
SBAS Ionosphere Correction by Applying
Double-difference Carrier Phase Measurements**

2018 년 2 월

서울대학교 대학원

기계항공공학부

한 덕 화

**이중차분 반송파 측정치를 활용한
SBAS 전리층 보정정보 정확도
향상에 관한 연구**

**A Study on Improving the Accuracy of
SBAS Ionosphere Correction by Applying
Double-difference Carrier Phase Measurements**

지도교수 기 창 돈

이 논문을 공학박사 학위논문으로 제출함

2017 년 10 월

서울대학교 대학원

기계항공공학부

한 덕 화

한덕화의 공학박사 학위논문을 인준함

2017 년 12 월

위 원 장 : _____

부위원장 : _____

위 원 : _____

위 원 : _____

위 원 : _____

초 록

GPS의 활용도는 점차 많아지고 있으며 최근에는 항공기의 정밀 접근에도 사용되고 있다. 이러한 수요를 만족시키는 높은 항법 성능을 제공하기 위하여 위성항법 보정시스템이 개발되고 있다. 그 중에서 SBAS는 GPS의 오차에 대한 보정정보 및 무결성 정보를 제공함으로써 사용자 항법 성능을 향상 시키는 시스템이다.

SBAS 사용자의 항법 성능을 저하시키는 가장 큰 오차 요인은 전리층 지연 오차이며, 전리층이 활발한 환경일수록 영향을 크게 받는다. 전리층 지연에 대한 SBAS의 보정정보를 적용한 후에도 수 m 이상의 잔여 오차를 발생시킬 수 있으므로 SBAS 사용자의 항법 성능을 개선시키기 위해서는 이에 대한 오차를 정확히 보정 하는 것이 필요하다. 본 논문에서는 SBAS 전리층 보정정보의 성능 향상을 위하여 IFB 추정과 전리층 모델링 성능을 개선시키는 연구를 수행하였다.

IFB는 GPS 측정치로부터 전리층 지연 값을 추출할 때 발생하는 바이어스 오차로 정확한 전리층 보정정보 제공을 위해서 필수적으로 제거되어야 한다. IFB는 추정에 활용되는 기준국 네트워크가 넓게 분포할수록 유리하며, 우리나라와 같이 좁은 기준국 네트워크에서는 IFB 추정 정확도가 저하되는 문제가 있다. 본 논문에서는 이에 대해 정확도 저하 원인을 분석하였으며, IFB를 상수로 두는 기간을 확장 시키는 간단한 방법으로 좁은 네트워크에서의 IFB 추정 성능을 향상 시킬 수 있음을 실제 측정치를 활용한 테스트로 검증하였다.

전리층 모델링과정에서 사용되는 기존 의사거리 기반의 모델링 방식에서

는 외곽 영역에서 성능 저하가 발생한다. 외곽 영역에서는 측정치수도 적을 뿐만 아니라 큰 측정치 오차가 발생하여 보정정보의 성능을 저하시킨다. 본 연구에서는 이중 차분 반송파 측정치를 활용하는 새로운 전리층 모델링 알고리즘을 개발하여 이러한 문제를 극복할 수 있는 방안을 제시하였다. RTK에서 추정되는 미지정수가 제거된 이중차분 전리층 지연 측정치는 의사거리보다 훨씬 정밀한 측정치 특성을 지니고 있다. 제안된 알고리즘은 의사거리 측정치와 함께 이중차분 반송파 측정치를 전리층 모델링에 활용함으로써 전리층 보정정보의 외곽 영역에서 모델링 성능을 개선시켰다.

제안된 알고리즘의 타당성과 성능을 평가하기 위하여 실제 한국의 기준국들로 SBAS 기준국을 구성하고 전리층 보정정보를 생성하여 테스트를 수행하였다. 5개의 기준국으로부터 측정치를 수집하고, 전처리, IFB 보상, 전리층 모델링, 메시지 생성, SBAS 항법해 계산 과정을 구현하여 제안된 알고리즘의 성능을 평가하였다. 제안된 알고리즘의 성능 향상을 확인하기 위하여 IDW, Kriging과 같은 기존의 SBAS 전리층 보정정보 생성 알고리즘과 비교를 수행했다. 사용자 의사거리 영역 검증 결과에서 제안된 알고리즘이 기존 알고리즘 대비 저양각 위성에 대한 보정정보 성능을 크게 향상시키는 것을 확인하였고, SBAS 항법해 계산 결과에서도 기존 방법대비 오차를 줄이는 것을 확인하였다.

주요어 : GPS, SBAS, 전리층 모델링, 이중차분 반송파, IFB 추정

학 번 : 2011-20767

목 차

1장. 서 론	1
1. 연구 동기 및 목적	1
2. 연구 동향	3
1) IFB 추정 연구	3
2) 의사거리 측정치 오차로 인한 모델링 성능 저하 개선을 위한 연구	4
3. 연구 내용 및 방법	5
4. 연구 결과의 기여도	6
2장. SBAS 개요	8
1. GNSS 오차 요인	8
1) 위성 궤도 및 시계 오차	8
2) 전리층 지연 오차	9
3) 대류층 지연 오차	11
4) 수신기 관련 오차 및 다중 경로 오차	12
5) DOP	13
6) 오차 요인 종합	15
2. GNSS 항법 성능	15
3. 보정 항법 시스템 개요	18
4. SBAS 시스템 구성 요소	21
3장. SBAS 전리층 보정정보	24
1. 전리층 보정정보생성 알고리즘	24
1) GPS 측정치	25
2) 측정치 전처리	27
3) IFB 추정 및 보상	29
4) 전리층 Map 모델링	33
5) 보정 메시지 생성	40

2. 사용자 알고리즘.....	47
4장. IFB 추정 알고리즘.....	50
1. IFB 추정 원리.....	50
1) IFB 추정의 기본 가정.....	53
2) IFB 추정 식.....	54
2. 좁은 네트워크의 IFB 추정 성능 개선 방안.....	58
1) 좁은 네트워크의 위성 IFB 추정 필요성.....	58
2) 좁은 네트워크의 위성 IFB 추정 성능 저하 요인.....	62
3) 위성 IFB 추정 성능 개선 방안.....	67
3. IFB 추정 테스트 결과.....	74
1) 테스트 환경.....	74
2) 검증 방법.....	76
3) 테스트 결과.....	79
5장. 이중차분 반송파 측정치를 활용한 전리층 모델링 알고리즘.....	87
1. 전리층 모델링 측정치.....	87
1) 의사거리 기반 전리층 지연 측정치.....	87
2) 반송파 기반 전리층 지연 측정치.....	92
2. 의사거리와 이중차분 반송파 측정치를 활용한 전리층 모델링.....	95
1) 의사거리와 반송파 측정치를 활용한 모델링 원리.....	95
2) 전리층 모델링 알고리즘.....	99
3) 메시지 생성.....	109
3. 사용자 적용 알고리즘.....	115
1) 보정 정보 적용 알고리즘.....	115
2) 무결성 정보 적용 알고리즘.....	116
4. 시뮬레이션 테스트.....	122
1) 테스트 환경.....	122
2) 테스트 결과.....	123

5. 실측 데이터 테스트.....	135
1) 테스트 환경.....	135
2) 테스트 결과.....	137
6장. 결론 및 향후 과제.....	159
1. 결론.....	159
2. 향후 과제.....	160

List of Figures

Figure 2-1 the structure of atmosphere.....	9
Figure 2-2 cause of the multipath error	12
Figure 2-3 conceptual diagram for availability (left: available, right: not available)	17
Figure 2-4 Pseudorange based GPS augmentation system	19
Figure 2-5 limitation of LADGPS (ionospheric delay error).....	20
Figure 2-6 limitation of LADGPS (satellite error)	20
Figure 2-7 SBAS system concept.....	22
Figure 3-1 Flow chart for SBAS correction generation	25
Figure 3-2 satellite IFB example (unit : ns).....	31
Figure 3-3 receiver IFB example (unit : ns)	32
Figure 3-4 IPP selection for each IGP.....	34
Figure 3-5 Spherical harmonics modeling concept.....	39
Figure 3-6 SBAS grid point example	41
Figure 3-7 SBAS Message type 18	44
Figure 3-8 SBAS Message type 26	45
Figure 3-9 WAAS IGP example	46
Figure 3-10 EGNOS IGP example.....	46
Figure 3-11 MSAS IGP example	47
Figure 3-12 User ionospheric delay interpolation algorithm	48
Figure 4-1 IFB effect in slant ionospheric delay measurement.....	50
Figure 4-2 IFB effect in vertical ionospheric delay measurement	52
Figure 4-3 weighting function for IFB estimation	57
Figure 4-4 IFB error when using broadcasted TGD	59
Figure 4-5 zero-baseline test between trimble and novatel receiver (raw measurement)	61
Figure 4-6 zero-baseline test between trimble and novatel receiver (hatch filter measurement)	61
Figure 4-7 IGS reference station map	63

Figure 4-8 reference stations in Korea(CHJU, GANH, JINJ, KANR, SEJN).....	64
Figure 4-9 Elevation angel versus local time for each Korean reference station (PRN1~PRN8)	65
Figure 4-10 Elevation angel versus local time for each Korean reference station (PRN9~PRN16).....	65
Figure 4-11 Elevation angel versus local time for each Korean reference station (PRN17~PRN24).....	66
Figure 4-12 Elevation angel versus local time for each Korean reference station (PRN25~PRN32).....	66
Figure 4-13 satellite IFB varication for 12 years (ns)	68
Figure 4-14 Annual change in satellite IFB	68
Figure 4-15 Skyplot for CHJU station on September 1, 2014	69
Figure 4-16 Skyplot for CHJU station from March 1 to September 1, 2014.....	70
Figure 4-17 Elevation angle versus local time (7 month, PRN1~PRN8)	71
Figure 4-18 Elevation angle versus local time (7 month, PRN9~PRN16)	71
Figure 4-19 Elevation angle versus local time (7 month, PRN17~PRN24)	72
Figure 4-20 Elevation angle versus local time (7 month, PRN25~PRN32)	72
Figure 4-21 Global network	75
Figure 4-22 Korea Network	76
Figure 4-23 average pseudorange residual (case 1)	80
Figure 4-24 average pseudorange residual (case 2)	80
Figure 4-25 average pseudorange residual (case 3)	81
Figure 4-26 position error (case 1)	81
Figure 4-27 position error (case 2)	82
Figure 4-28 position error (case 3)	82
Figure 4-29 pseudorange residual versus local time (2014.09.01.)	84
Figure 4-30 pseudorange residual versus local time (2014.03.01~2014.08.01.)	86
Figure 5-1 Ionospheric delay measurement error (pseudorange, raw data).....	89
Figure 5-2 Ionospheric delay measurement error (pseudorange, hatch filter)	90
Figure 5-3 measurement error versus smoothing time (pseudorange, Hatch filter)	91
Figure 5-4 measurement error versus smoothing time (pseudorange, Hatch filter, modified	

axis).....	91
Figure 5-5 noise of double-difference ionospheric delay measurement	94
Figure 5-6 conceptual diagram for ionosphere modeling environment	96
Figure 5-7 conceptual diagram for ionosphere modeling using pseudorange measurement....	97
Figure 5-8 conceptual diagram for ionosphere modeling using pseudorange and double- difference carrier phase measurement	98
Figure 5-9 Ionosphere modeling process	100
Figure 5-10 IPP distribution example.....	101
Figure 5-11 RMS of modeling residual error versus priori sigma	112
Figure 5-12 distribution of spherical harmonics coefficient	114
Figure 5-13 distribution of covariance element of spherical harmonics coefficient.....	114
Figure 5-14 decorrelation error for spherical harmonics (simulation).....	118
Figure 5-15 Ionosphere Map example (Real data, 2014/09/01, GPS Time : 96060)	119
Figure 5-16 decorrelation error for spherical harmonics (real data, 2014.09.01)	120
Figure 5-17 decorrelation error for spherical harmonics (real data, 2014.09.12)	121
Figure 5-18 reference station and user (simulation).....	122
Figure 5-19 simulation environment (1 epoch, IONEX data).....	124
Figure 5-20 pseudorange measurement error versus elevation angle (simulation, 1 epoch) ..	125
Figure 5-21 double-difference carrier measurement error versus elevation angle (simulation, 1 epoch)	125
Figure 5-22 ionosphere modeling result using pseudorange (simulation, 1 epoch)	126
Figure 5-23 ionosphere modeling result using double-difference carrier phase (simulation, 1 epoch)	127
Figure 5-24 ionosphere modeling error when using pseudorange (simulation, 1 epoch).....	128
Figure 5-25 ionosphere modeling error when using double-difference carrier phase measurement (simulation, 1 epoch).....	128
Figure 5-26 ionosphere modeling result using double-difference carrier phase (bias removed, simulation, 1 epoch)	129
Figure 5-27 ionosphere modeling error when using double-difference carrier phase measurement (bias removed, simulation, 1 epoch)	129
Figure 5-28 ionosphere modeling result using pseudorange and double-difference carrier	

phase (simulation, 1 epoch)	130
Figure 5-29 ionosphere modeling error using pseudorange and double-difference carrier phase (simulation, 1 epoch)	131
Figure 5-30 Performance evaluation method in range domain (simulation)	132
Figure 5-31 range domain ionospheric delay residual history (simulation).....	133
Figure 5-32 RMS of range residual error versus elevation angle (simulation).....	133
Figure 5-33 Daily average Kp Index.....	136
Figure 5-34 reference station and user (real data)	137
Figure 5-35 Performance evaluation method in pseudorange domain (real data)	138
Figure 5-36 range domain ionospheric delay residual history (2014.09.01.)	139
Figure 5-37 95% range residual error versus elevation angle (2014.09.01.)	140
Figure 5-38 Probability distribution of range residual error (2014.09.01.).....	141
Figure 5-39 stanford plot example	144
Figure 5-40 normalized residual error histogram (2014.09.01.)	145
Figure 5-41 sigma UIRE histogram (2014.09.01.).....	145
Figure 5-42 CDF of 3-d position error (2014.09.01.)	147
Figure 5-43 range domain ionospheric delay residual history (2014.09.12.)	150
Figure 5-44 95% range residual error versus elevation angle (2014.09.12.)	151
Figure 5-45 Probability distribution of range residual error (2014.09.12.).....	152
Figure 5-46 normalized residual error histogram (2014.09.12.)	154
Figure 5-47 sigma UIRE histogram (2014.09.12.).....	155
Figure 5-48 CDF of 3-d position error (2014.09.12.)	156

List of Tables

Table 2-1 GPS error budget.....	15
Table 2-2 ICAO Required Navigation Performance requirement	16
Table 3-1 IGP definition (Band1~band4)	42
Table 3-2 IGP definition (Band1~band4)	43
Table 4-1 IFB estimation test setting.....	74
Table 4-2 Error removal method	77
Table 4-3 position error and pseudorange residual statistics.....	83
Table 5-1 Message for correction.....	113
Table 5-2 Message for integrity	113
Table 5-3 Ionospheric correction error statistics (simulation)	134
Table 5-4 Ionospheric correction error statistics for low elevation (simulation)	135
Table 5-5 Ionospheric correction error statistics (2014.09.12.)	142
Table 5-6 Ionospheric correction error statistics for low elevation angle (2014.09.12.)	142
Table 5-7 95% position error statistics (2014.09.01.)	148
Table 5-8 Total position error statistics (2014.09.01.)	148
Table 5-9 Ionospheric correction error statistics (2014.09.12.)	153
Table 5-10 Ionospheric correction error statistics for low elevation angle (2014.09.12.)	153
Table 5-11 95% position error statistics (2014.09.12.)	157
Table 5-12 Total position error statistics (2014.09.12.)	157

1장. 서론

1. 연구 동기 및 목적

GNSS 시스템은 활용도가 높은 장점으로 인해 지상 사용자, 차량, 항공기 등 여러 분야에서 항법 시스템으로 널리 활용되고 있다 [1-3]. 항공기 이착륙과 같은 높은 항법 성능을 요구하는 분야까지 GNSS의 활용 범위가 넓어짐에 따라서 항법 성능을 보강하기 위한 보정 시스템 연구가 수행되어 오고 있다. 이 중에 SBAS는 넓은 영역에 배치된 기준국들로부터 벡터 형식의 위성, 전리층 보정정보를 제공함으로써 사용자의 항법 성능을 향상시키는 시스템으로 APV-I, LPV 200과 같은 정밀 접근 단계까지 항법 서비스를 제공하고 있다 [4]. 현재 미국의 WAAS (Wide Area Augmentation System), 유럽의 EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service), 일본의 MSAS (Multi-functional Satellite Augmentation System), 인도의 GAGAN (GPS-aided GEO augmented navigation)이 운영되고 있다 [5-7]. 우리나라에서도 SBAS 구축을 위한 사업이 2002년부터 수행되어왔으며 [8, 9], 2014년부터는 한국형 SBAS인 KASS (Korea Augmentation Satellite System) 개발에 착수하여 2022년까지 APV-I 서비스를 제공하는 시스템을 개발할 계획이다 [10, 11].

전리층 지연 오차는 GNSS의 가장 큰 오차 요인으로 SBAS 사용자의 항

법 성능에도 가장 큰 영향을 미친다. 따라서 SBAS 항법 성능을 개선시키기 위해서는 전리층 보정정보의 성능을 향상시키는 것이 필수적이다. 전리층 보정정보의 성능을 향상시키기 위해서는 보정정보 생성 단계에서 발생하는 여러 가지 성능 저하 요인을 개선 시켜야 한다. 전리층 보정정보의 성능을 저하 시키는 대표적인 요인으로서는 전리층 지연 측정치 생성과정에서 발생하는 IFB (Inter-Frequency Bias) 오차, 의사거리 기반의 전리층 지연 측정치의 오차로 인한 전리층 모델링 오차가 있다.

SBAS에서는 여러 기준국으로부터 측정치를 이중 주파수 측정치를 수집하여 전리층 지연 측정치를 수집하는데, 전리층 지연 측정치에는 위성과 수신기의 IFB가 포함되어 있다. 측정치로부터 이러한 IFB 값을 추정하고 보상해야만 정확한 전리층 지연 측정치를 얻고 보정정보를 정밀하게 생성할 수가 있는데, 우리나라와 같이 좁은 네트워크를 가지고 있는 경우 IFB를 추정 정확도가 저하되는 문제가 존재한다. SBAS는 시스템의 기준국들로만 독립적으로 데이터를 얻고 보정정보를 생성할 수 있어야 하므로 앞으로 우리나라에 구축될 KASS의 보정정보 향상을 위해서는 좁은 네트워크에서도 IFB를 정확하게 추정할 수 있어야 한다.

전리층 모델링 과정에서 발생하는 오차는 의사거리 측정치 오차가 크게 영향을 미친다. SBAS는 각 기준국에서 측정된 의사거리 측정치를 기반으로 보정정보를 생성한다. 의사거리는 다중경로 오차와 잡음과 같은 측정치 오차가 큰 특성을 지니고 있으며 특히 저양각의 경우 수 m 수준의 측정치 오차를 가지고 있다. 이로 인해 저양각 위성 주변에 대하여 생성된 보정정보의 성능이 저하되는 문제점을 보이며 사용자가 외곽으로 갈수록 큰 성능 저하가 발생할 수 있다.

본 연구에서는 위와 같이 측정치 획득 단계, 전리층 모델링 단계에서 발생하는 성능 저하 요인을 극복하기 위한 방안을 제시하고자 한다.

2. 연구 동향

본 논문은 좁은 네트워크의 IFB 추정 성능 저하와 의사거리 측정치 오차로 인한 전리층 모델링 성능 저하를 개선하기 위한 연구를 수행하였다. 본 절에서는 각각에 대한 연구 동향을 살펴보도록 한다.

1) IFB 추정 연구

IFB는 위성, 수신기에서 L1, L2 주파수의 신호를 처리하는 회로의 전기적 경로의 차이로 인하여 발생하는 바이어스 이다. L1, L2 측정치를 차분하는 경우 발생하는 값으로 정확한 전리층 지연 측정치 획득을 위해서는 필수적으로 제거되어야 하며 전리층 모델링과 관련된 연구에서는 오래 전부터 진행되어 왔다 [12, 13]. IFB 추정은 1개의 수신기 단독으로는 추정이 어려우며 여러 개의 수신기 측정치를 모아서 추정이 된다. 넓은 영역에 배치되어있는 기준국들을 활용하여 추정을 할 때 더 정확한 추정이 가능하며, IGS 기관에서는 전 세계에 퍼져있는 기준국들을 바탕으로 일별로 IFB 값을 추정하고, IONEX (IONosphere map Exchange) 형식의 파일에 전리층 지연 모델링 결과와 함께 제공 해오고 있다 [14].

좁은 네트워크의 경우, 위성의 IFB 값은 GPS 방송 궤도력의 TGD 값으로 보상하고, 수신기 IFB 값만을 추정한 사례가 있다 [15-17]. 그러나 GPS 방송 궤도력의 TGD 값을 그대로 활용하는 경우에는 $-1.5 \sim 1.5\text{m}$ 에 해당하는 오차를 전리층 지연 측정치에 발생 시킬 수 있다 [18].

Xue는 IFB 추정에 사용되는 기준국 네트워크를 변경하면서 발생하는 성능 변화에 대한 연구를 수행하였다 [19]. 이 연구에서는 기준국 네트워크 크기가 작아짐에 따라 성능저하가 발생하는 결과를 제시하였으나 이에 대한

개선 방안에 대해서는 제시하지 못했다.

2) 의사거리 측정치 오차로 인한 모델링 성능 저하 개선을 위한 연구

의사거리의 측정치 오차 개선을 위한 연구로는 상대적으로 훨씬 정밀한 측정치 품질을 가지는 반송파 측정치를 활용한 연구가 있는데, 반송파 측정치를 어떻게 활용하는가에 따라 크게 두 가지로 분류할 수 있다.

첫 번째 방법은 반송파 측정치를 활용하여 의사거리 측정치의 오차를 줄이는 것이다. 반송파 측정치는 미지정수를 포함하고 있으므로 절대 값을 알 수 없지만 시간에 대한 변화량은 정밀하게 측정이 가능하다. 이러한 특성을 활용한 Hatch 필터가 제안 되어 의사거리 측정치 오차를 줄이는 데 큰 기여를 하였고 [20], 기존 SBAS에서도 이러한 Hatch 필터로 smoothing 된 의사거리 측정치를 활용하여 전리층 모델링을 수행해 왔다 [15, 21]. 이러한 방법의 한계로는 필터가 수렴하기까지는 여전히 큰 측정치 오차 수준을 가지고 있다는 것이다. 이로 인하여 가시성이 확보되는 초기 구간에는 여전히 보정정보의 성능 저하가 발생하게 된다.

두 번째 방법으로는 반송파 측정치를 전리층 모델링의 측정치로 활용하는 것이다. 이러한 연구는 주로 이중차분 반송파를 활용하는 RTK 연구에서 주로 수행이 되어 왔다. 반송파의 경우 절대 값을 알기 어려우므로 RTK에서는 이중차분 측정치를 구성하고, 이중차분 된 측정치의 미지정수를 추정하여 항법 해를 계산한다. RTK에서는 이중 차분된 전리층 지연 측정치를 획득할 수가 있고, 이를 활용한 전리층 모델링 기법이 제안이 된바 있다 [22, 23]. Schaer는 spherical harmonics 모델로 이중차분 반송파 기반 전리층 지연 측정치를 활용한 전리층 맵 모델링을 수행하였다 [22]. Liao는 추정하고자 하는 grid들을 상태변수로 두고 이중 차분 반송파 기반 전리층 지연

측정치를 활용하여 전리층 맵을 추정을 수행하였다 [23]. 위 연구들은 이중 차분 측정치 영역에서 모델링이 잘 되었는지를 검증하였으며, 차분되지 않은 전리층 값에 대해서는 면밀한 분석이 이루어 지지 않았다.

3. 연구 내용 및 방법

본 논문에서는 SBAS 전리층 보정정보의 성능을 저하 시키는 IFB 추정 오차, 의사거리 측정치 오차로 인한 모델링 오차를 개선하는 방법에 대하여 연구하였다.

우리나라와 같이 좁은 기준국 네트워크를 가지는 경우 IFB 추정 성능이 저하되는 문제가 발생한다. 기존의 연구에서는 위성의 IFB 값을 최대 1일 까지 상수로 두고 추정을 하는 방법이 사용되어 왔다 하였다 [19, 24-30]. 이러한 가정을 두고 IFB를 추정하는 경우, 좁은 네트워크의 경우 전리층이 활발한 시간대에서만 측정치가 수집되는 위성들이 존재한다. IFB의 추정 오차는 전리층 모델링의 오차와 직접적인 연관을 갖는다. 전리층이 활발한 시간대에서는 전리층 모델링 오차가 증가하고, 이에 따라 IFB 추정 오차가 증가하는 위성들이 존재한다. 최근 연구 결과에서는 위성 IFB 값이 장기간에 걸쳐 거의 변하지 않는다고 제시되었으며 [30, 31], 본 연구에서는 이를 활용하여 IFB를 상수로 두는 기간을 훨씬 확장함으로써 추정 오차를 감소시키는 방법을 제시하였다. 상수로 두는 기간을 확장함에 따라 특정 위성이 전리층이 강한 시간대에서만 측정치가 수집되는 현상을 해소하여 해당 위성의 추정 오차를 감소시켰다. IFB 값의 true 데이터를 확보할 수 없는 문제가 있으므로 추정 결과의 검증은 각각의 IFB 값을 적용 했을 때 나타나는 의사거리 잔차와 위치 오차를 확인하는 간접적인 방법으로 수행하였다.

기존 SBAS 전리층 보정정보에서 의사거리 측정치의 측정치 오차로 인하

여 낮은 양각 위성이 존재하는 외곽 영역의 성능이 저하되는 문제는 이중 차분 반송과 측정치를 활용하여 개선을 수행하였다. 의사거리 기반 전리층 지연 측정치는 절댓값 정보를 가지고 있지만 낮은 양각의 측정치 품질이 크게 떨어지는 특성을 지니고 있다. 반면에 이중 차분 반송과 측정치의 경우 절댓값 정보가 아닌 상대적인 값의 정보만 주지만 측정치 오차가 의사거리 대비 훨씬 작은 특성을 지니고 있다. 기존에 각각의 측정치를 활용하여 따로 모델링을 수행한 연구는 있었으나 동시에 활용하는 모델링 방법은 제안된 바 없다. 본 논문에서는 두 가지의 측정치가 가지는 장점을 극대화하기 위하여 두 가지 측정치를 동시에 활용한 모델링을 수행하였다. 기존 SBAS의 보간 기법에서는 이중 차분 측정치를 활용하기 어려운 문제가 존재하므로 전리층 모델링 기법 중 spherical harmonics를 활용하여 전리층 지연 맵을 모델링 하였다. 이에 따라 기존의 격자 형식의 메시지가 아닌 spherical harmonics에 잘 맞는 계수와 추정 분산을 각각 보정 정보, 무결성 정보로 하는 메시지 안을 제시하였다.

제안된 전리층 모델링 방식을 테스트하기 위하여 전국에 분포된 기준국들 중 SBAS 후보 기준국을 선정하여 전리층 모델링 및 보정정보 생성을 하였다. 성능 개선 효과를 검증하기 위하여 기존의 방법인 IDW (Inverse Distance Weight), kriging 방식도 구현하여 결과를 비교하였다. 여러 지역에 위치한 사용자를 배치하고 각각의 사용자에게서 나타나는 전리층 보정정보의 오차를 의사거리 영역에서 분석을 수행하였다. 그리고 실제 SBAS 사용자의 항법해 계산에 각각의 전리층 보정정보를 적용할 때 나타나는 성능 차이를 분석하였다.

4. 연구 결과의 기여도

본 논문에서는 SBAS 사용자 항법 성능에 가장 큰 영향을 주는 전리층 보정정보의 성능을 개선시키는 연구를 수행하였다. SBAS 전리층 보정정보의 성능 저하 원인을 분석하는 과정에서 다음과 같은 기여를 하였다.

첫째로 좁은 기준국 네트워크의 IFB 추정 성능 개선 방법을 제안하였다. 기존의 1일동안 상수로 두는 가정을 깨고, 기간을 확장하는 단순한 방법만으로도 IFB를 추정할 때 발생하는 오차들이 상당히 줄어들 수 있음을 확인하였다. 이를 활용하면 우리나라 기준국만으로도 전리층 지연 측정치의 IFB 보상 과정에서 발생하는 오차를 상당 부분 줄이는 것이 가능하다.

둘째로 모델링을 수행하는 외곽 영역에서 발생하는 성능 저하를 개선시킬 수 있는 새로운 모델링 기법을 제시하였다. 의사거리와 이중차분 반송파 측정치를 활용한 전리층 모델링 특성을 각각 분석하였으며 이를 동시에 활용할 수 있는 알고리즘을 개발 하였다. 의사거리, 이중차분 반송파 측정치를 동시에 활용한 spherical harmonics 모델링 기법을 제시하였으며, 제안된 기법의 적용 시 각각의 측정치를 활용한 모델링의 장점이 결합됨으로써 외곽 영역에서의 보정정보 성능이 개선됨을 확인하였다.

셋째로 Spherical harmonics의 모델링 결과를 사용자에게 손실이 적게 전달 할 수 있도록 spherical harmonics 계수를 메시지화 하는 방안을 제시하였다. 기존의 spherical harmonics 모델링 연구에서는 무결성 정보까지 제공하기 위한 연구는 수행된 사례가 없었다. 그러나 SBAS 에서는 무결성 정보의 제공이 필수적이므로 이를 위한 구체적인 메시지안을 제시하였다.

마지막으로 실제 기준국 측정치를 활용하여 측정치 전처리, 전리층 맵 모델링, 보정정보 및 무결성 정보 생성, SBAS 항법해 계산에 이르는 전 과정을 모두 구현하여 제안된 기법의 성능을 분석함으로써 제안된 기법의 실질적인 적용 가능성을 확인하였다.

2장. SBAS 개요

1. GNSS 오차 요인

1) 위성 궤도 및 시계 오차

GPS를 활용하여 위치를 계산하기 위해서는 GPS 위성의 정확한 위치와 시각 정보가 필요하다. GPS는 지구상에 넓게 분포한 기준국으로부터 위성 신호를 수집하여 궤도와 시계오차 파라미터를 추정한다. 추정된 GPS 위성의 위치와 시각에 대한 정보는 항법 메시지를 통해 사용자에게 전달되는데, 이를 방송궤도력(broadcast ephemeris)이라 한다. GPS 수신기는 이 정보를 활용하여 가시 위성의 위치, 시각 정보를 계산하고 항법해 계산을 수행한다. 이때, 방송되는 궤도, 시계 정보에는 오차가 존재하며 이로 인해 사용자 항법해 계산의 오차가 발생하게 된다.

국제 GNSS 연구기관인 IGS (International GNSS Service)에서는 후처리로 정밀하게 GPS 위성의 궤도 시각 정보를 계산하여 제공하고 있다. 이러한 정밀 데이터를 기반으로 GPS 위성의 오차를 분석하는 연구들이 수행된 바 있다 [32-34]. 장기간 분석 결과에서 GPS 현대화가 진행됨에 따라 점차적으로 위성 궤도, 시계의 오차는 작아지고 있지만 여전히 수 m 수준의 오차를 지닌다.

2) 전리층 지연 오차

① 전리층 지연 오차 발생 원인

전리층은 대기권 고도에서 약 60km에서 1000km 범위에 해당하는 영역으로써 기체 분자가 전리되어 자유전자가 밀집된 지역이다. Figure 2-1는 고도에 따른 대기권 구조를 나타낸 그림으로 전리층의 경우 고도에 따른 전자 밀도가 도시되어 있다 [15]. 전리층의 활동은 여러 가지 요인에 영향을 받는데, 특히 태양 활동과 밀접한 관계가 있다.

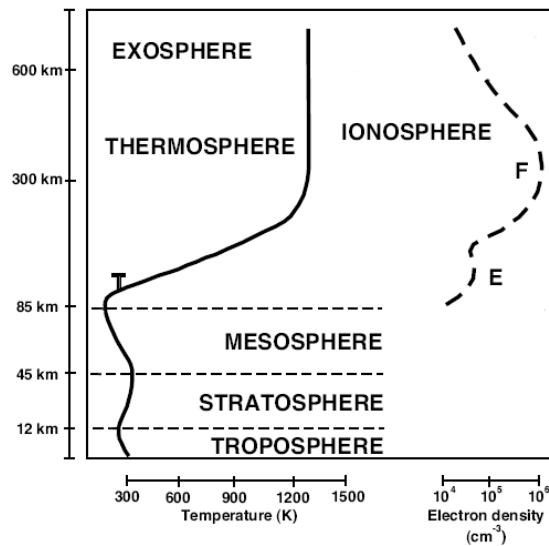


Figure 2-1 the structure of atmosphere

전리층 지연 오차는 GPS 신호가 전리층을 지날 때, 매질의 굴절률 변화로 전파가 지연됨으로써 발생하게 된다. 전리층은 dispersive한 특성을 갖는 매질로 신호에 발생하는 지연량은 주파수에 따라 다르게 나타난다.

신호가 위성에서 수신기까지 가는 동안의 총 전자량(Total Electron

Content)을 식으로 나타내면 다음과 같다[2].

$$TEC = \int n_e dl \quad (2-1)$$

n_e : electron density

신호에 발생하는 전리층 지연은 TEC에 비례하며 신호 주파수의 제곱에 반비례하게 나타나고, 전리층 지연량을 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$I = \frac{40.3}{cf^2} TEC \quad (2-2)$$

I : ionospheric delay

f : signal frequency

전리층 지연 오차는 보정하지 않는 경우 가장 큰 오차를 유발할 수 있는 요인으로 GPS 위성에서 기본적으로 보정을 위한 데이터를 제공하며, 더 정확한 보정을 위해서는 보정 항법 또는 이중 주파수 항법을 사용해야 한다.

② Thin shell 모델

전리층은 앞서 설명한 바와 같이 넓은 고도에 걸쳐 존재하면서 GPS 신호에 영향을 준다. 전리층 관련 연구에서는 3차원 분포를 가정하여 tomography 방식의 모델을 사용하기도 하지만 [35, 36], 이보다 단순한 모델을 널리 사용해 왔으며 이를 thin shell 모델이라 한다. Thin shell 모델은 전리층이 한 고도에 집중되어 있다고 가정하는 방식으로 전리층을 단순화한

다. 사용자의 LOS (Line Of Sight) 벡터가 전리층 기준 고도를 지나는 지점을 전리층 통과점이라고 하며 사용자에게 발생하는 전리층 지연 크기를 전리층 통과점에서의 수직 전리층 지연 값과 mapping function의 곱으로 나타낸다. 이 mapping function을 obliquity factor라고도 하며 여러 가지 계산 방식이 존재한다 [37-39]. GPS 방송궤도력에서 제공하는 전리층 보정 모델인 klobuchar 모델도 이와 같은 thin shell 모델을 가정하고 있으며 [40], SBAS에서도 thin shell 모델을 가정하고 보정정보를 제공한다 [41]. 다음 식은 thin shell 모델에서 사용하는 obliquity factor중 SBAS에서 정의된 함수를 나타낸 식이다.

$$F_{pp} = \left[1 - \left(\frac{R_e \cos \theta}{R_e + h_I} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (2-3)$$

R_e : 6378136.0 m

h_I : 350000.0 m

3) 대류층 지연 오차

대류층은 Figure 2-1에서 보는 바와 같이 대기권의 아래쪽에 위치한다. 대류층에서의 굴절율은 대기의 온도, 습도, 압력에 영향을 받게 되는데 이에 따라 신호에 지연량이 달라지게 된다. 대류층 지연은 전리층과는 달리 신호의 주파수에 따라 달라지지 않는 nondispersive한 특성을 지니므로 서로 다른 주파수의 신호에서도 같은 지연 값을 보인다 [2]. 대류층 지연의 크기는 양각이 낮은 위성의 경우 20m 이상으로 나타날 수 있지만 보정 모

델이 매우 정확한 편이며 보정 후 오차는 일반적으로 수십 cm이하의 값을 보인다.

4) 수신기 관련 오차 및 다중 경로 오차

① 다중 경로 오차

GPS 수신기에서 신호가 수집되는 환경에 따라서 GPS 위성 신호의 직접파 이외에 주변에 반사되어 들어오는 반사파가 함께 들어올 수 있다. Figure 2-2는 GPS 수신기에 주변 건물에 반사된 신호가 들어가는 것을 나타낸 개념도이다. 이러한 반사파가 수신기에 들어가게 되는 경우 직접파의 변형을 일으킬 수 있으며 수신기에서 GPS 측정치를 생성할 때 오차를 발생 시키게 된다.

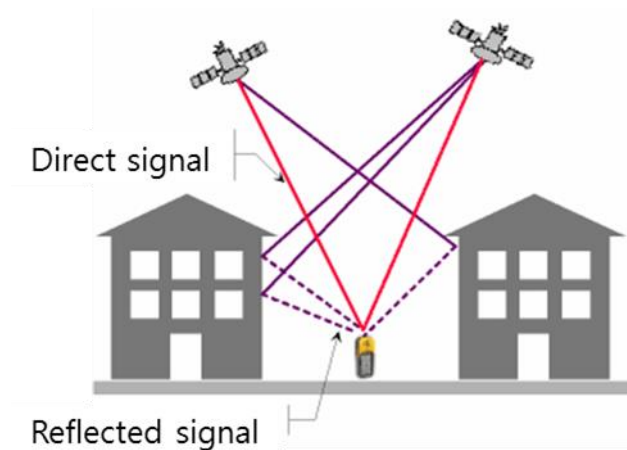


Figure 2-2 cause of the multipath error

낮은 양각의 위성일수록 반사를 유발하는 장애물들이 많이 존재할 수 있으므로 더 큰 다중 경로 오차를 보인다. 이러한 특성을 고려하여 다중 경로 오차를 줄이기 위하여 mask angle의 설정을 통해 너무 낮은 양각의 위성을 사용하지 않는 방법이 기본적으로 사용될 수 있다. 수신기 내부에서 수신되는 신호의 다중 경로 오차를 감소시키기 위한 신호 추적 알고리즘도 개발된 바 있으며 [42, 43], 이외의 방법으로는 출력되는 측정치에서 다중 경로 오차를 추정하여 제거하는 방법[44, 45], 초크링 안테나와 같이 다중 경로 오차를 감소시키는 안테나를 사용하는 방법 등이 있다.

② 수신기 관련 오차

수신기 내부에서는 열 잡음(thermal noise)이 발생한다. 일반적으로는 수십 cm 수준의 오차 수준을 지니며 앞서 언급한 다중 경로 오차보다는 작은 값을 보인다. 이후 GPS 측정치를 설명하는 과정에서 자세히 다루겠지만, 다중 경로 오차와 수신기 잡음은 반송파 측정치보다 의사거리 측정치에서 훨씬 큰 수준으로 나타나는 특성이 있다. 따라서 의사거리를 활용하는 경우 원시데이터를 바로 사용하기보다는 필터링과 같은 기법을 사용하여 다중 경로 오차와 수신기 잡음 오차를 줄이고 사용하는 것이 일반적이다.

5) DOP

DOP (Dilution Of Precision) 는 위성의 기하학적 배치가 위치 오차에 미치는 영향을 수치적으로 나타내는 값이다. 즉, 의사거리의 오차를 $\Delta \rho$ 라 할 때, 위치 오차 $\Delta \mathbf{x}$ 가 얼마나 나타나는지를 나타내는 지표이다. ENU(East-North-Up) 좌표계에서 구성된 관측 행렬을 \mathbf{G} 라 하면 의사거리 오차, 위치 오차의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{G}\Delta\mathbf{x} = \Delta\mathbf{p} \quad (2-4)$$

\mathbf{G} : observation matrix in ENU coordinate

$\Delta\mathbf{x}$: position error vector

$\Delta\mathbf{p}$: pseudorange error vector

위 식으로부터 $\Delta\mathbf{x}$ 와 공분산 행렬을 계산하는 식은 아래와 같다.

$$\Delta\mathbf{x} = (\mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \Delta\mathbf{p} \quad (2-5)$$

$$\text{cov}(\Delta\mathbf{x}) = (\mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \text{cov}(\Delta\mathbf{p}) \mathbf{G} (\mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-T} \quad (2-6)$$

모든 위성의 오차수준이 같다고 가정하고, 위치 오차의 공분산 행렬을 계산하면 간략하게 나타내면 아래 식과 같다.

$$\text{cov}(\Delta\mathbf{x}) = \sigma_{\Delta\rho}^2 (\mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-1} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx}^2 & \sigma_{xy}^2 & \sigma_{xz}^2 & \sigma_{xB}^2 \\ \sigma_{xy}^2 & \sigma_{yy}^2 & \sigma_{yz}^2 & \sigma_{yB}^2 \\ \sigma_{xz}^2 & \sigma_{yz}^2 & \sigma_{zz}^2 & \sigma_{zB}^2 \\ \sigma_{xB}^2 & \sigma_{yB}^2 & \sigma_{zB}^2 & \sigma_{BB}^2 \end{bmatrix} \quad (2-7)$$

$\sigma_{\Delta\rho}$: standard deviation of pseudorange error

위 공분산 식에서 확인할 수 있듯이 위치 오차의 공분산은 위성과 수신기의 기하학적 배치에 따른 관측행렬에 영향을 받으며 $(\mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-1}$ 를 DOP 행렬이라 한다. DOP 행렬을 활용하면 주어진 의사거리 오차에 대하여 위치오차가 어떻게 나타날지 대략적으로 예측해 볼 수 있다.

6) 오차 요인 종합

앞서 설명한 GPS 오차 요인들로 인하여 각 위성의 전체 거리 오차는 5m 이상의 수준으로 나타나게 된다. 요인 별로 오차의 크기를 RMS 값으로 정리해보면 Table 2-1와 같다 [15]. 각 오차에 대해서 바이어스 성분과 랜덤 성분을 구분하여 정리하였다.

Table 2-1 GPS error budget

List	Bias (m)	Random (m)	Total (m)
satellite orbit	2.1	0.0	2.1
satellite clock	2.0	0.7	2.1
ionospheric delay	4.0	0.5	4.0
tropospheric delay	0.5	0.5	0.7
multipath	1.0	1.0	1.4
Noise	0.5	0.2	0.5
range	5.1	1.4	5.3
Range(smoothed)	5.1	0.4	5.1
Horizontal position error (HDOP=2.0일 때)			10.2
Vertical position error (VDOP=2.5일 때)			12.8

2. GNSS 항법 성능

GNSS 항법 성능은 일반적으로 정확성, 무결성, 연속성, 가용성이라고 하는 4가지 성능으로 평가된다 [46-48]. 정확성은 추정된 위치와 실제 위치의 차이인 항법 시스템의 오차로 평가되고, 오차가 작을수록 높은 정확성 성능을 갖는다. 무결성이란 항법 시스템이 제공하는 정보가 정상적인지 신

뢰성을 의미한다. 또한 항법 시스템이 신뢰할 수 없는 상황에서 사용자가 이를 사용하지 않도록 경고해줄 수 있는지에 대한 능력을 포함한다. 연속성이란 시스템이 작동 중에 예기치 못한 중단 없이 본연의 기능을 잘 수행하는지에 대한 능력을 의미한다. 가용성이란 아래 그림과 같이 앞서 설명한 정확성, 무결성, 연속성에 대한 요구조건들을 모두 만족하여 항법 시스템이 사용가능 할 때 달성되는 성능을 의미한다. 엄밀한 의미에서는 다른 성능들이 모두 만족되어야 하지만, 관습적으로 가용성의 평가는 단순히 보호수준이 경보한계보다 작은 시간의 비율로서 계산이 된다.

이러한 GNSS 항법 성능에 대하여 국제민간항공기구(ICAO)에서는 항행 단계별로 요구조건을 규정하고 있다. Table 2-2는 ICAO에서 정의한 요구조건을 나타낸 표이다 [47]. En-route에서 공항 정밀 접근 단계인 CAT-I으로 갈수록 점차 높은 수준의 요구조건을 규정하고 있다.

Table 2-2 ICAO Required Navigation Performance requirement

Operation	Horizontal Accuracy (95%)	Vertical Accuracy (95%)	HAL (Horizontal Alert Limit)	VAL (Vertical Alert Limit)	TTA (Time-to-Alert)	Integrity	Continuity	Availability
En-route (Oceanic/ Continental)	3.7 km (2.0 NM)	N/A	7.4 km (4.0 NM)	N/A	5 min	1-1x10 ⁻⁷ /h	1-1x10 ⁻⁴ /h to 1-1x10 ⁻⁸ /h	0.99 to 0.99999
En-route (Continental)	3.7 km (2.0 NM)	N/A	3.7 km (2.0 NM)	N/A	5 min			
En-route, Terminal	0.74 km (0.4 NM)	N/A	1.85 km (1 NM)	N/A	15 s			
NPA	220 m	N/A	556 m (0.3 NM)	N/A	10 s			
APV-I	16 m	20 m	40 m	50 m	10 s	1-2x10 ⁻⁷ per approach	1-8x10 ⁻⁶ per any 15 s	
APV-II	16 m	8 m	40 m	20 m	6 s			
CAT-I	16 m	4-6 m	40 m	10-15 m	6 s			

위 요구조건 표 중에서 무결성과 관련된 개념들을 정리하면 다음과 같다. 먼저 보호수준의 값이 항법해 계산 시 함께 계산이 되는데, 보호수준은 위치 오차의 신뢰수준을 나타내는 통계적인 범위를 의미한다. 실제 항공기와 같은 사용자는 실시간 운행 시에 자신의 위치 오차가 얼마나 되는지 알수가 없으므로 보호수준이라는 신뢰 수준을 통해 운행을 지속할 수 있는지 확인을 한다. 보호수준 값은 무결성 요구조건에 정의된 확률과 같이 매우 높은 확률로 위치 오차를 bound 해야 한다.

경보 한계(Alert Limit) 값은 해당 운항 단계에서 허용되는 최대 위치 오차의 허용 값을 의미한다. 경보 한계 값은 무결성 관련해서도 사용되지만, 보호수준과의 비교를 통해 가용성 판단에도 사용된다. Figure 2-3는 가용성 판단에 대한 개념도를 나타낸 것이다.

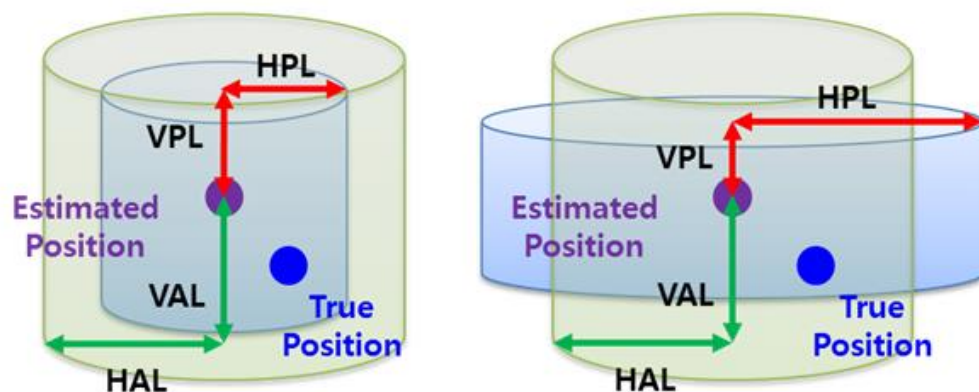


Figure 2-3 conceptual diagram for availability
(left: available, right: not available)

왼쪽 그림과 같이 보호수준 값이 경보 한계보다 작은 경우에는 시스템이

가용하다고 판단되며, 오른쪽 그림과 같이 보호수준 값이 경보 한계보다 큰 경우에는 시스템이 가용하지 못하다고 판단된다.

현재 운용 중인 SBAS 중에서 대표적인 시스템 중 하나인 EGNOS에서는 APV-I 서비스를 제공하고 있으며 WAAS에서는 이보다 조금 더 강화된 LPV-200 서비스를 제공하고 있다.

3. 보정 항법 시스템 개요

GPS의 활용도가 점차 늘어가고 있으며 앞서 언급했던 ICAO 요구조건 표에서 제시된 항공기 이착륙과 같은 분야에서도 사용이 되고 있다. GPS 여러 가지 오차 요인들로 인해 GPS 단독으로는 이러한 높은 성능을 만족하기가 어려우며, GPS의 오차 요인들을 보상하기 위한 연구가 지속적으로 수행되고 있다. 이러한 연구의 일환으로 개발된 것이 GPS 보강 시스템이다. 여러 가지 형태의 보강 시스템이 개발되어 오고 있는데, Figure 2-4는 의사 거리 기반의 보정항법 시스템을 분류한 그림이다.

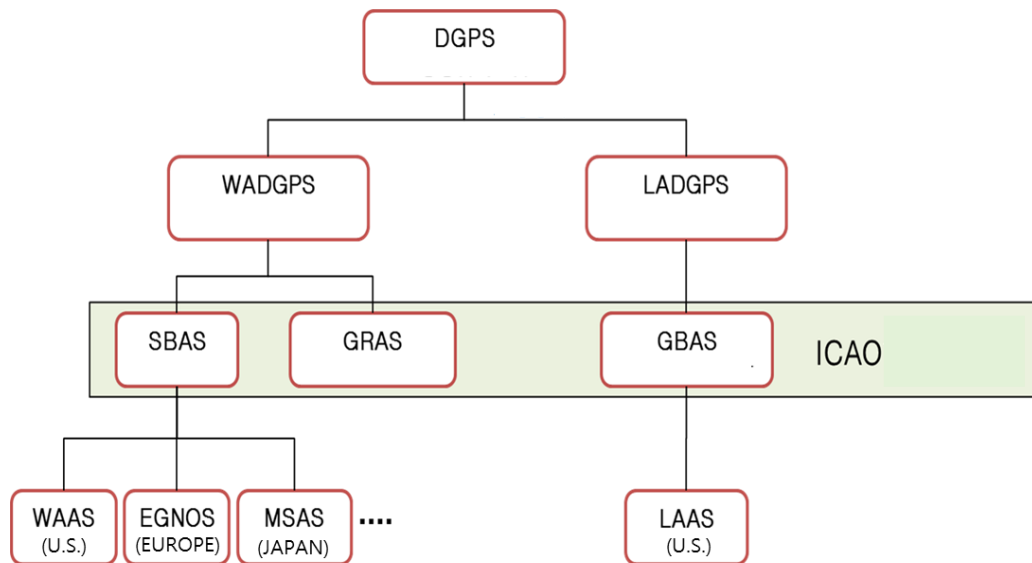


Figure 2-4 Pseudorange based GPS augmentation system

먼저 보정 방식에 따라 광역 보정시스템과 지역 보정 시스템으로 분류가 된다. 지역 보정 시스템은 위성 관련 오차, 전리층 지연 오차, 대류층 지연 오차가 가까운 거리에서는 유사한 값을 가진다는 특성을 이용하여 기준국에서 의사거리 오차를 계산하고 사용자에게 제공해 주는 방식이다. 기준국에서는 정확한 위치를 알고 있으므로 기준국과 위성간의 거리를 계산할 수 있고, 의사거리에 포함된 오차를 계산할 수 있다. 지역 보정 시스템의 한계는 사용자가 기준국으로부터 멀어질수록 오차가 점차 달라진다는 것이다. 단순 스칼라량으로 의사거리 오차를 제공해 주는 방식으로는 이러한 공간이격 오차를 제대로 보상할 수 없으며 성능 저하가 발생한다. 넓은 지역을 대상으로 보정항법 서비스를 제공하기 위해서는 수 많은 기준국을 설치해야 하는 문제가 존재한다. Figure 2-5와 Figure 2-6은 각각 전리층 지연 오차와 위성 궤도 오차에 대하여 기준국, 사용자간의 거리가 멀어짐에 따라 오차가

증가하는 것을 개념적으로 나타낸 것이다 [15].

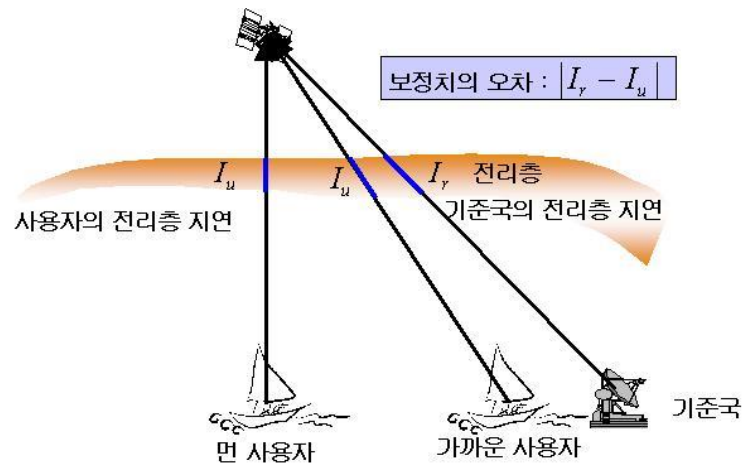


Figure 2-5 limitation of LADGPS (ionospheric delay error)

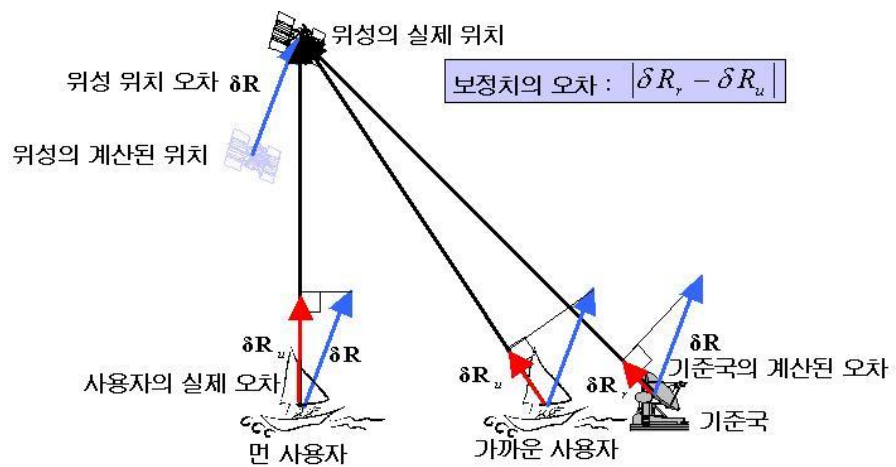


Figure 2-6 limitation of LADGPS (satellite error)

광역 보정시스템은 이러한 지역 보강시스템의 한계를 극복하기 위하여 제안된 시스템이다 [49]. 광역 보정 시스템은 오차 요인을 구분하고 각각에 대한 보정정보를 벡터량으로 제공함으로써 넓은 영역의 사용자가 위치에 상관 없이 균일한 수준의 항법 성능을 가질 수 있도록 한다. 이러한 장점으로 상대적으로 훨씬 적은 기준국수로도 지역 보정시스템 보다 넓은 영역에 서비스가 제공이 가능하다. ICAO에서는 오차의 전달 방식에 따라서 SBAS, GRAS (Ground Based Augmentation System)로 구분하고 있는데, SBAS는 위성에서 보정 메시지를 방송하는 형태이며 GRAS는 지상의 기준국에서 메시지를 방송하는 형태이다. 현재 구축되어 운영되고 있는 SBAS는 미국의 WAAS, 유럽의 EGNOS, 일본의 MSAS, 인도의 GAGAN 이 있다. 본 연구에서 다루고 있는 시스템인 광역 보정 시스템에 대해서 이후부터는 ICAO 용어인 SBAS로 명칭을 통일하였다.

4. SBAS 시스템 구성 요소

Figure 2-7는 SBAS 시스템 구성 요소를 나타낸 개념도이다.

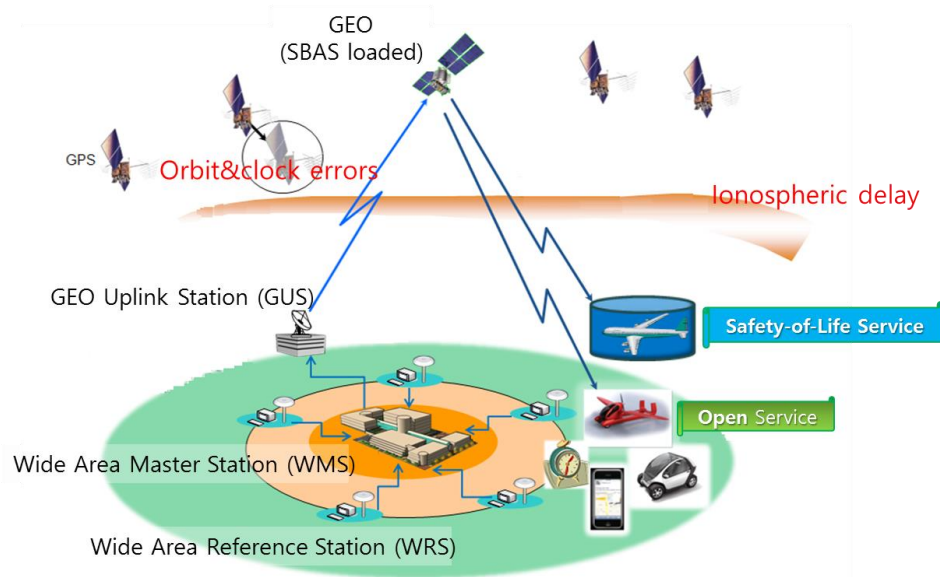


Figure 2-7 SBAS system concept

광역기준국, 중앙처리국, 지구국, 정지궤도 위성으로 구성되어 있으며 각각에 대한 설명은 아래와 같다.

① 광역기준국(Wide Area Reference Station)

SBAS가 구축된 지역에 넓게 분포하며, GPS 위성으로부터 데이터를 수집하는 역할을 한다. 기준국의 배치는 SBAS의 커버리지에 직접적인 영향을 주는 요소로 가능한 넓게 분포하는 것이 유리하다. 기준국에서는 수집된 측정치 및 항법 데이터를 중앙처리국으로 전송한다.

② 중앙처리국(Wide Area Master Station)

SBAS의 가장 핵심적인 구성요소로 사용자에게 전달할 보정정보, 무결성

정보를 생성하는 역할을 수행한다. 광역기준국으로부터 전달받은 측정치 및 항법 데이터를 바탕으로 위성의 궤도 및 시계 오차와 해당 지역의 전리층 지연 오차를 추정한다. 추정된 오차 정보는 메시지화하고 지구국으로 전달한다.

③ 지구국(GUS)/정지궤도 위성(GEO)

지구국은 중앙처리국으로부터 전달받은 보정 메시지를 정지궤도 위성으로 다시 전달하는 역할을 수행한다. 그리고 정지궤도 위성에서는 최종적으로 사용자에게 L1 주파수의 신호로 보정 메시지를 방송한다. GPS와 같은 주파수로 방송이 되므로 사용자는 별도의 장비 없이 보정정보를 사용할 수 있다.

④ 사용자

SBAS를 활용한 보정항법을 수행하기 위해서는 벡터량의 정보인 SBAS 보정정보를 처리하여 자신의 위치에 맞는 의사거리 보정치를 계산해야 한다. 계산된 의사거리 보정치 및 오차 수준을 현재 GPS 측정치에 적용하여 항법을 수행한다.

3장. SBAS 전리층 보정정보

1. 전리층 보정정보생성 알고리즘

SBAS에서는 여러 기준국으로부터 측정치를 수집하고, 전처리 및 IFB 보정을 거쳐 전리층 맵을 모델링한다. 모델링된 맵을 기반으로 격자 형식의 메시지를 사용자에게 제공하며 사용자는 격자 메시지를 받은 후, 자신의 가시 위성이 지나는 전리층 통과 점에 맞게 보정정보를 보간하여 의사거리 보정정보를 생성한다. Figure 3-1은 SBAS 기준국으로부터 측정치가 수집되고, 사용자에게 보정정보가 전달되기까지의 흐름을 나타낸 다이어그램이다.

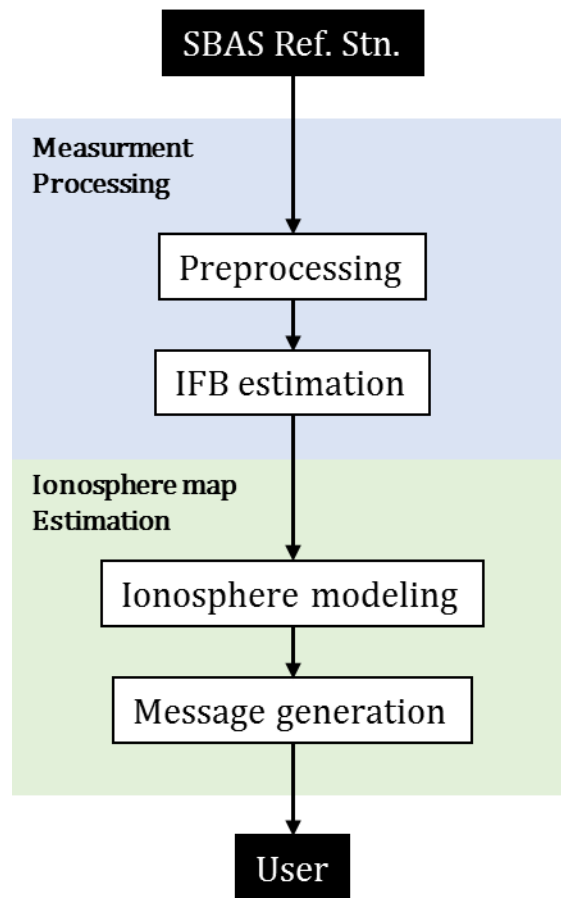


Figure 3-1 Flow chart for SBAS correction generation

위 그림과 같이 생성 과정을 대략적으로 구분할 수 있으며, 각각에 대하여 전반적인 설명을 하도록 한다.

1) GPS 측정치

GPS 위성에서는 L1, L2 주파수의 신호를 방송하고 있으며 최근에 발사

된 위성에서는 새로운 주파수 대역인 L5 위성에서도 신호를 방송하고 있다 [50]. 수신기에서는 각 주파수 대역의 의사거리, 반송파 위상 측정치를 출력하며 다음은 각각을 나타낸 식이다 [15, 51].

$$\rho_1 = d - (b + b_{\rho 1}^{Tx}) + I + T + (B + b_{\rho 1}^{Rx}) + \varepsilon_{\rho 1} \quad (3-1)$$

$$\rho_2 = d - (b + b_{\rho 2}^{Tx}) + \gamma I + T + (B + b_{\rho 2}^{Rx}) + \varepsilon_{\rho 2} \quad (3-2)$$

$$\phi_1 = d - (b + b_{\phi 1}^{Tx}) - I + T + (B + b_{\phi 1}^{Rx}) + N_1 \lambda_1 + \varepsilon_{\phi 1} \quad (3-3)$$

$$\phi_2 = d - (b + b_{\phi 2}^{Tx}) - \gamma I + T + (B + b_{\phi 2}^{Rx}) + N_2 \lambda_2 + \varepsilon_{\phi 2} \quad (3-4)$$

ρ_1, ρ_2 : L1 and L2 pseudorange

ϕ_1, ϕ_2 : L1 and L2 carrier phase

i_1 : ionospheric delay in L1 frequency

γ : ratio between L1 and L2 frequency $= (77/60)^2 \approx 1.65$

b : satellite clock error

b^{Tx} : satellite hardware bias

b_{Rx} : receiver hardware bias

B : receiver clock offset

$\varepsilon_{\rho 1}, \varepsilon_{\rho 2}$: pseudorange noise and multipath error

$\varepsilon_{\phi 1}, \varepsilon_{\phi 2}$: carrier phase noise and multipath error

N_1, N_2 : integer ambiguity

λ_1, λ_2 : wave length

의사거리, 반송파 측정치는 정밀도에서 매우 큰 차이를 보인다. 의사거리 측정치는 수 m 수준의 잡음, 다중경로 오차를 보인다. 이로 인해 단순 의사거리 측정치를 그냥 사용하게 되는 경우에는 큰 오차를 발생시키게 된다. 따라서 일반적으로 단순 의사거리 측정치를 사용하는 것이 아니라 필터링을

통하여 보정된 의사거리 측정치를 사용하게 된다. 반송파 위상 측정치는 1/100 가량의 훨씬 작은 잡음, 다중경로 오차를 가지고 있으므로 의사거리 측정치에 반송파 측정치를 함께 필터링에 사용함으로써 잡음, 다중경로 오차에 의한 오차를 감소시킨다.

반송파 위상 측정치는 정밀한 특성을 지니고 있지만 미지정수라는 바이어스 항이 포함되어 있어 이를 제거하지 않는 경우 절대 거리 정보를 얻을 수 없다.

또 다른 주요한 차이는 전리층 지연의 부호가 다르다는 것이다. 의사거리에서는 전리층이 지연오차로 나타나며 반송파 위상 측정치에서는 앞섬 오차로 나타나게 된다.

전리층 지연은 주파수에 따라서도 다르게 나타나는 특성이 있다. 주파수의 제곱에 반비례하는 특성이 있으며, 이로 인해 주파수가 더 낮은 L2 주파수에서 더 큰 지연효과를 보인다.

2) 측정치 전처리

앞서 언급하였듯이 의사거리 오차는 바로 사용하기에 상당히 큰 잡음, 다중경로 오차를 가지고 있으므로 반송파를 활용한 필터링을 통해 보정하여 사용하게 된다. 대표적인 필터로 Hatch filter가 제안된바 있다 [20]. 기본 Hatch 필터는 L1 주파수의 의사거리, 반송파만을 활용하는데, smoothing constant를 크게 늘릴 경우 전리층 지연의 부호가 반대이기 때문에 발산하는 문제가 있다. 이를 개선하기 위하여 이중 주파수 측정치를 활용한 divergence-free hatch 필터가 고안되었다. Divergence-free hatch filter는 L1, L2 측정치의 조합으로 반송파의 전리층 부호를 의사거리와 맞춰주고 필터링에 사용되게 함으로써 발산 현상을 제거하였다. Kee는 divergence-free hatch filter에 각 측정치간 오차수준을 고려하여 가중치를

주는 weighted hatch filter 를 제안하였다 [52]. 다음은 weighted hatch filter 식을 나타낸 것이다 [53].

$$\hat{\rho}_1(k) = \frac{\hat{\sigma}_1^2(k)}{\hat{\sigma}_1^2(k-1)} \left[\hat{\rho}_1(k-1) + \Delta\phi(k) - \frac{2}{\gamma-1} \Delta(d\phi(k)) \right] + \frac{\hat{\sigma}_1^2(k)}{\sigma_1^2(k)} \cdot \rho_1(k) \quad (3-5)$$

$$d\hat{\rho}(k) = \frac{\hat{\sigma}_{d\rho}^2(k)}{\hat{\sigma}_{d\rho}^2(k-1)} \left[d\hat{\rho}(k-1) - \Delta(d\phi(k)) \right] + \frac{\hat{\sigma}_{d\rho}^2(k)}{\sigma_{d\rho}^2(k)} \cdot d\rho(k) \quad (3-6)$$

$$\frac{1}{\hat{\sigma}_1^2(k)} = \frac{1}{\hat{\sigma}_1^2(k-1)} + \frac{1}{\sigma_1^2(k)} \quad (3-7)$$

$$\sigma_1^2(k) = \sigma_{\rho_1(k)}^2 + \tilde{\sigma}_{\Delta\phi(k)}^2 \approx \sigma_{\rho_1(k)}^2 \quad (3-8)$$

$$\tilde{\sigma}_{\Delta\phi(k)}^2 = \left(\frac{\gamma+1}{\gamma-1} \right)^2 \cdot \sigma_{\Delta\phi(k)}^2 + \left(\frac{2}{\gamma-1} \right)^2 \cdot \sigma_{\Delta\phi_2(k)}^2 \quad (3-9)$$

$$\sigma_{\Delta\phi(k)}^2 = \sigma_{\phi(k)}^2 + \sigma_{\phi(k-1)}^2 \quad (3-10)$$

$$\sigma_{\Delta\phi_2(k)}^2 = \sigma_{\phi_2(k)}^2 + \sigma_{\phi_2(k-1)}^2 \quad (3-11)$$

$\sigma_{\rho_1(k)}$: standard deviation of L1 pseudorange measurement noise at k-th epoch

$\sigma_{\phi(k)}$: standard deviation of L1 carrier phase measurement noise at k-th epoch

$\sigma_{\phi_2(k)}$: standard deviation of L2 carrier phase measurement noise at k-th epoch

$$\frac{1}{\hat{\sigma}_{d\rho}^2(k)} = \frac{1}{\hat{\sigma}_{d\rho}^2(k-1)} + \frac{1}{\sigma_{d\rho}^2(k)} \quad (3-12)$$

$$\sigma_{d\rho}^2(k) = \sigma_{d\rho(k)}^2 + \sigma_{\Delta(d\phi(k))}^2 \approx \sigma_{d\rho(k)}^2 \quad (3-13)$$

$$\sigma_{\Delta(d\phi(k))}^2 = \sigma_{\Delta\phi_1(k)}^2 + \sigma_{\Delta\phi_2(k)}^2 \quad (3-14)$$

$\sigma_{d\rho(k)}$: standard deviation of difference between L1 and L2 pseudorange measurement noise at k-th epoch

위 필터링 된 측정치로부터 전리층 지연 추정치는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$I_{meas}(k) = \frac{d\hat{\rho}(k)}{\gamma - 1} \quad (3-15)$$

$$\sigma_{I_{meas}}^2(k) = \frac{\hat{\sigma}_{d\rho}^2(k)}{(\gamma - 1)^2} \quad (3-16)$$

3) IFB 추정 및 보상

위 식과 같이 구해지는 전리층 지연 측정치에는 L1 주파수 대역에서 발생하는 전리층 지연 정보와 함께 IFB 값을 포함하고 있다. 측정치 모델에서 볼 수 있듯이 수집되는 각각의 측정치에는 서로 다른 hardware bias 항들이 포함되어있다. 하나의 위성에 대해서 L1, L2 주파수에 존재하는 hardware bias가 다르며, 하나의 수신기에 대해서도 L1, L2 주파수의 hardware bias가 다르다. 이러한 차이는 위성, 수신기 각각에서 L1, L2 신

호를 처리하는 회로의 전기적 경로차이가 다르기 때문에 발생하게 된다. 따라서 L1, L2 주파수를 차분하는 경우 이러한 주파수간 바이어스가 남게 되며 이를 IFB라고 한다. IFB를 고려하여 식을 다시 나타내면 아래 식과 같다.

$$I_{meas} = I - IFB^{Tx} + IFB^{Rx} \quad (3-17)$$

$$IFB^{Tx} = \frac{1}{\gamma - 1} (b_{\rho 2}^{Tx} - b_{\rho 1}^{Tx}) \quad (3-18)$$

$$IFB^{Rx} = \frac{1}{\gamma - 1} (b_{\rho 2}^{Rx} - b_{\rho 1}^{Rx}) \quad (3-19)$$

I_{meas} : ionospheric delay measurement

I : real ionospheric delay

IFB^{Tx} : satellite IFB

IFB^{Rx} : receiver IFB

IFB의 정의는 $1/(\gamma - 1)$ 를 제외한 단순 바이어스끼리의 차이 값으로도 정의되기도 하는데, 본 논문에서는 수식의 간략화를 위하여 $1/(\gamma - 1)$ 가 포함된 항으로 정의를 하였다.

IFB는 수 m ~ 수십 m 의 값을 가지므로 보상하지 않는 경우 수집되는 전리층 지연 측정치에 상당히 큰 바이어스가 존재하게 된다. Figure 3-2은 GPS 위성에서 나타나는 IFB 값을 추정한 예시이다 [54].

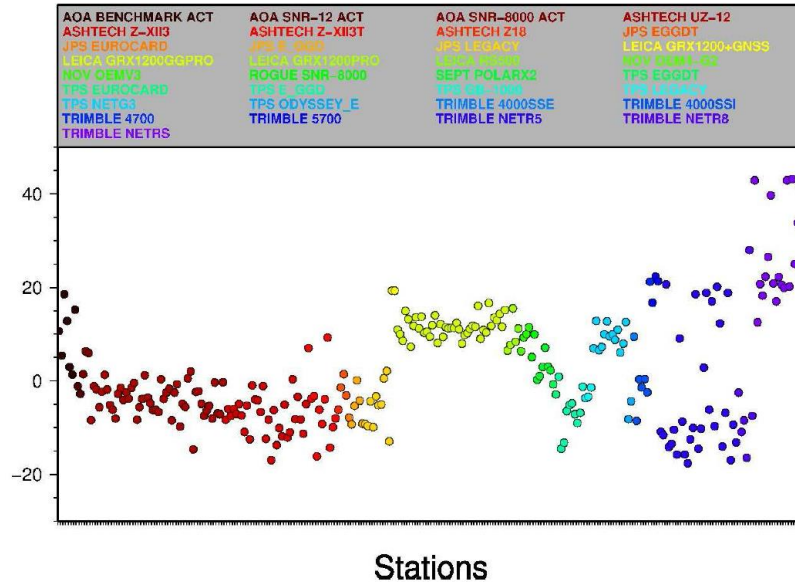


Figure 3-3 receiver IFB example (unit : ns)

수신기 기종 별로 추정된 IFB 값들이 도시 되었으며 각 수신기는 색깔로 구분되어있다. 수신기의 경우 기종에 따라 다르지만 전체적으로 위성보다 큰 IFB 값을 보이고 있다. 최대 40ns까지 발생하고 있으며 이는 12m에 해당하는 IFB 값을 의미한다. 따라서 전리층 지연 측정치에는 $1/(\gamma-1)$ 가 곱해진 20 m까지 IFB로 인한 오차를 발생시킬 수 있다. 위성과 마찬가지로 같은 기종의 수신기에 대해서는 유사한 IFB 값을 보이는 특성이 있다.

IFB 값은 기준국 단독으로는 추정이 어려우며 여러 기준국을 활용하여 추정을 하게 된다. 여러 기준국으로부터 수집되는 전리층 지연 측정치들로부터 위성 IFB, 수신기 IFB, 전리층 지연 값을 각각 상태변수로 두고 동시에 추정을 하게 된다. 구체적인 추정 방법에 대해서는 4장에서 다루도록 한다.

4) 전리층 Map 모델링

SBAS의 전리층 모델링 알고리즘으로는 IDW, planar fit, kriging이 있다. 가장 빨리 SBAS를 구축하고 운영해오고 있는 WAAS에서는 Kriging 알고리즘을 활용하여 전리층 지연을 모델링하고 사용자에게 보정 메시지를 제공해주고 있다. WAAS가 완전히 구축되기 전에는 거리에 따라 가중치를 주는 IDW알고리즘을 활용한 모델링 방식이 제안되었다 [21]. 이후에는 격자점 주변을 평면함수로 모델링하는 planar fit 알고리즘을 사용하여 보정정보를 생성하는 방안이 제시되었다 [55]. WAAS가 구축되고 운영되는 시점에는 kriging 알고리즘을 활용한 모델링 방식이 제안되어 사용되고 있다 [56, 57].

전리층 모델링은 SBAS에서 뿐만 아니라 전리층 활동의 분석 등 다양한 목적으로 수행되고 있다. 위 소개된 알고리즘 이외에 wavelet [16], spherical harmonics 등이 전리층을 모델링하는 방식으로 활용된 바 있다 [36, 58-60]. 또한 앞선 모델들과는 달리 shell 모델 가정을 벗어나 전리층을 3차원으로 모델링하는 tomography 방법도 연구된 바 있다 [35, 36].

① IDW

IDW 알고리즘은 격자 점의 수직 전리층 지연 추정을 위하여 보간을 수행할 때, 사용되는 측정치들이 추정하고자 하는 격자 점으로부터 얼마나 떨어져 있는지 거리를 기반으로 하여 가중치를 설정하는 방식이다. 전리층 지연 오차는 거리가 멀어짐에 따라 천천히 변화하는 특성을 가지고 있다. 즉, 측정치들에 대하여 추정하고자 하는 위치와 거리가 가까울수록 비슷한 크기의 전리층 지연을 갖기 때문에 거리가 가까울수록 큰 가중치를 할당하고,

거리가 멀어질수록 작은 가중치를 할당하여 보간을 수행하게 된다.

특정 격자 점에 대하여 보간을 통해 값을 추정하기 위해서는 먼저 보간에 사용될 측정치들을 선별해야 한다. 추정하고자 하는 격자 점에서 너무 멀어질 경우에는 격자점에서의 전리층 지연 값과 큰 차이가 발생할 수 있으므로 적절한 측정치 선별이 필요하며 Kim 은 Figure 3-4와 같이 제한 반경을 1000 km 로 설정하여 반경 안에 들어오는 측정치들을 선별하여 보간에 활용하였다 [15].

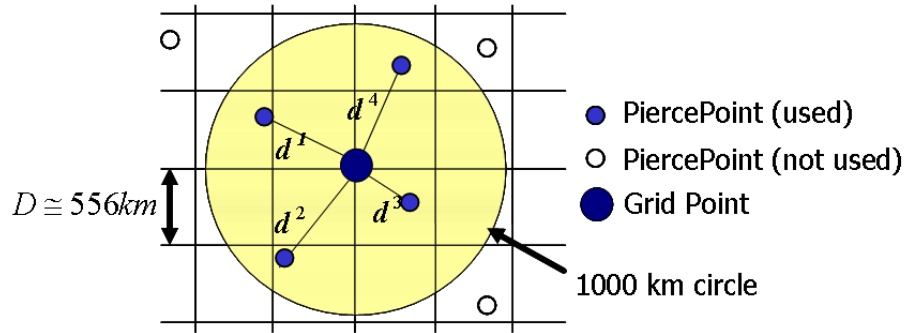


Figure 3-4 IPP selection for each IGP

제한 반경으로 선별된 측정치들을 바탕으로 격자점의 수직 전리층 지연 값을 추정하는 식은 아래와 같다.

$$\hat{I}_{Grid,V} = I_{Klob,V}^{Grid} \frac{\sum_{k=1}^K \left[\left(\frac{I_{measure,V}^k}{I_{Klob,V}^k} \right) \cdot w_k \right]}{\sum_{k=1}^K w_k} \quad (3-20)$$

$\hat{I}_{Grid,V}$: estimated ionospheric delay at IGP
 $I_{Klob,V}^{Grid}$: ionospheric delay at IGP calculated from klobuchar model
 $I_{Klob,V}^k$: ionospheric delay at IPP calculated from klobuchar model
 $I_{measure,V}^k$: vertical ionospheric delay measurement
 w_k : weighting for each measurement

Chao의 연구에서는 단순히 측정치들만을 사용하는 것이 아니라 GPS 위성에서 방송 궤도력으로 제공되는 Klobuchar 모델을 함께 사용하여 추정을 하였다 [21].

가중치를 설정할 때는 단순 거리뿐만 아니라 측정치 각각의 오차 수준을 고려해야 한다. 측정치의 오차 수준이 클수록 작은 가중치를 할당해야 하며 거리가 멀어질수록 높은 가중치를 할당해야 한다. 이를 고려한 가중치 식은 아래와 같다.

$$w_k = \left(\frac{\Delta_k}{\sigma_k} \right)^2 \quad (3-21)$$

$$\Delta_k = \exp \left[- (d_k / 2D)^2 \right] \quad (3-22)$$

이 때, d_k 는 격자점에서 통과점까지의 거리이고, D 는 기준 거리로써 5도 간격 격자점의 평균 간격에 해당하는 556km를 사용한다.

격자 점에서의 분산 추정 식은 아래와 같다.

$$GIVE = 3.29 \times \sqrt{1 / \sum_{n=1}^K w_k} \quad (3-23)$$

② Kriging

Kriging 기법도 앞서 설명한 IDW와 마찬가지로 주변 데이터를 바탕으로 추정하고자 하는 위치에서의 값을 보간을 통하여 추정하는 방식이다. 즉, 제한 반경을 설정하여 추정에 사용할 측정치를 선별하고, 측정치들 각각에 적절한 weighing을 설정하여 선형 조합을 통해 추정하는 기법이다. 앞서 설명된 IDW와 다른 점은 weighing을 설정하는 방식에 있다.

Kriging은 데이터의 공간적 형상을 어떻게 가정하는가에 따라 구분이 되는데 단순 상수로 가정하는 경우 ordinary kriging, 평면으로 가정하는 경우 universal kriging이라 한다. Universal kriging에 대하여 구성된 식을 나타내었으며 다음은 기본 추정 식을 나타낸 것이다 [61, 62].

$$\begin{aligned}\tilde{I}(\Delta x) &= \sum_{k=1}^N \lambda_k I_{meas}(\Delta x_k) \\ &= \lambda^T \bar{I}_{IPP}\end{aligned}\tag{3-24}$$

λ : weighting vector

\bar{I}_{IPP} : measurement vector

위 기본 식에서 unbiased, minimum variance를 갖는 최적의 추정 값을 얻기 위한 가중치를 계산하며 다음은 그 결과 정리되는 식을 나타낸 것이다.

- unbiased solution

$$G^T \lambda = s\tag{3-25}$$

$$G = \begin{bmatrix} 1 & \Delta x_1^T \cdot \hat{e}_{east} & \Delta x_1^T \cdot \hat{e}_{north} \\ 1 & \Delta x_2^T \cdot \hat{e}_{east} & \Delta x_2^T \cdot \hat{e}_{north} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \Delta x_N^T \cdot \hat{e}_{east} & \Delta x_N^T \cdot \hat{e}_{north} \end{bmatrix} \quad (3-26)$$

$$s = \begin{bmatrix} 1 & \Delta x^T \cdot \hat{e}_{east} & \Delta x^T \cdot \hat{e}_{north} \end{bmatrix} \quad (3-27)$$

– minimum variance

$$\tilde{\sigma}^2(w) = \left\langle \left(r(\Delta x) - \lambda^T [r_{IPP} + \varepsilon_{IPP}] \right)^2 \right\rangle \quad (3-28)$$

$$r_{IPP} = \begin{bmatrix} r(\Delta x_1) & r(\Delta x_2) & \cdots & r(\Delta x_N) \end{bmatrix} \quad (3-29)$$

위 식에서 꺾쇠 표시는 기대 값을 의미하며, unbiased solution 조건으로 부터 식을 간략화하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \tilde{\sigma}^2(w) &= \lambda^T \cdot \left\langle r_{IPP} r_{IPP}^T \right\rangle \cdot \lambda - 2\lambda^T \cdot \left\langle r(\Delta x) r_{IPP} \right\rangle \\ &\quad + \left\langle r^2(\Delta x) \right\rangle + \lambda^T \cdot \left\langle \varepsilon_{IPP} \varepsilon_{IPP}^T \right\rangle \cdot \lambda \\ &= \lambda^T \cdot C \cdot \lambda - 2\lambda^T \cdot c + c_0 + \lambda^T \cdot M \cdot \lambda \end{aligned} \quad (3-30)$$

M : measurement covariance

C : covariance of the detrended ionospheric delay between measurement

c : covariance of between the scalar field at a position Δx near the IGP and detrended delays at the measurement location

c_0 : variance of the scalar field

위 식에서 측정치의 공분산 행렬은 측정치 오차 모델링 결과로부터 계산이 되며 나머지 공분산 행렬들은 공간적 상관성을 의미하는 variogram 이라는 개념을 도입하여 계산된다. 경험적으로 각 위치 간에 발생할 수 있는 차이 값을 계산하여 variogram을 구성하며 식은 아래와 같다.

$$\gamma(\Delta x_k, \Delta x_\zeta) \triangleq \frac{1}{2} \cdot \left\langle \left[r(\Delta x_k) - r(\Delta x_\zeta) \right]^2 \right\rangle \quad (3-31)$$

실제 적용 시에는 위 식으로부터 얻어지는 결과를 특정 함수로 모델링하여 사용하게 된다. Lagrange multiplier를 도입하여 바이어스가 없는 상태에서 최소 분산 조건을 만족시키는 최적 가중치를 찾으면 식은 다음과 같다.

$$\lambda = \left[W - WG(G^T WG)^{-1} G^T W \right] c + WG(G^T WG)^{-1} s \quad (3-32)$$

$$W = \left[C + M \right]^{-1} \quad (3-33)$$

③ Spherical harmonics

Spherical Harmonics는 2차원의 면 기저함수들을 활용하여 데이터를 모델링 하는 기법이다. 중력 모델링, 컴퓨터 이미지 프로세싱 등 다양한 분야에서 사용되어 왔으며 [63], 전리층 지연 연구에도 자주 사용되어 왔다 [36, 58]. 임의의 데이터를 fourier series로 모델링하는 것과 유사하게 3차원의 데이터는 서로 orthogonal한 spherical harmonics 기저함수들의 선형 조합으로 표현이 될 수 있다. Figure 3-5는 spherical harmonics를 활용

한 모델링의 개념도를 나타낸 것이다. 3차원의 데이터를 각각의 3차원 기저함수들의 선형조합으로 표현할 수 있다고 가정한다. 해당 데이터를 정확하게 표현하기 위하여 각각의 기저함수에 곱해져야 할 계수 값이 얼마인지 추정을 하게 된다. 해당 계수를 적절하게 추정하게 되는 경우 데이터와 유사한 형상으로 모델링을 할 수 있다.

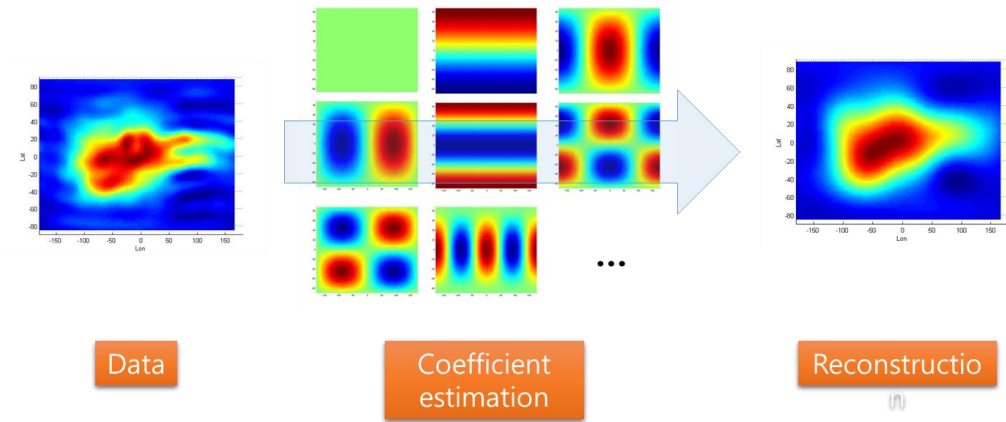


Figure 3-5 Spherical harmonics modeling concept

Spherical harmonics를 활용하여 수직 전리층을 모델링하는 식은 다음과 같다.

$$I_v(\phi, \lambda) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^n P_{nm}(\sin(\phi)) \cdot \{C_{nm} \cdot \cos(m\lambda) + S_{nm} \cdot \sin(m\lambda)\} \quad (3-34)$$

I_v : vertical ionospheric delay

ϕ : latitude

λ : longitude

P_{nm} : associated Legendre function

C_{nm}, S_{nm} : spherical harmonics coefficient

N : degree

위 수직 전리층 지연 식을 경사지연으로 바꾸는 식은 obliquity Q 를 곱한 아래 식과 같다.

$$I(\phi, \lambda) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^n P_{nm}(\sin(\phi)) \cdot \{C_{nm} \cdot \cos(m\lambda) + S_{nm} \cdot \sin(m\lambda)\} \cdot Q \quad (3-35)$$

Spherical harmonics에서는 설정하는 degree, order에 따라서 표현할 수 있는 resolution이 달라지게 된다. 높은 degree, order를 설정할수록 더 많은 기저 함수를 사용하여 더 높은 해상도의 데이터를 모델링 할 수 있다. 모델링하고자 하는 데이터가 특정 방향으로 높은 해상도를 지니고 있지 않다면 일반적으로 degree, order는 같은 값으로 설정하게 된다. 모델링 할 때 degree, order는 각각 n 으로 설정을 하는 경우 기저함수는 총 $(n+1)^2$ 개를 활용하게 된다.

본 논문에서 제안한 이중차분 측정치를 활용한 모델링에서는 spherical harmonics 식이 사용되었다.

5) 보정 메시지 생성

SBAS는 서비스 지역의 전리층 지연에 대한 정보를 격자 맵으로 사용자에게 전달해준다. Figure 3-6은 SBAS에서 정의한 전리층 보정정보 전달을 위한 격자 정의를 나타낸 그림이다 [41].

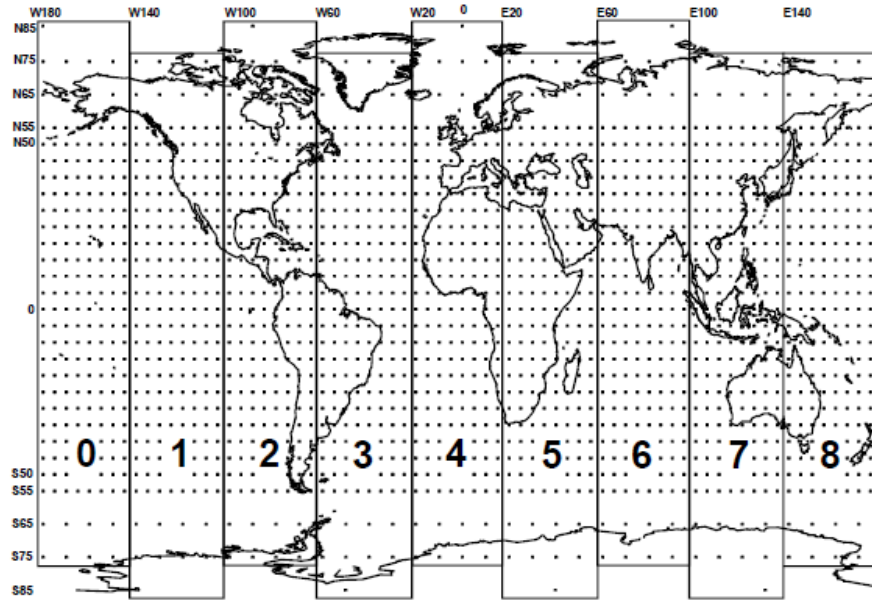


Figure 3-6 SBAS grid point example

전 세계에 대하여 격자 점이 정의되어 있으며 위도 55까지는 5도 간격으로 정의가 되어있다. 고위도 지역에는 그보다 큰 간격으로 정의가 되어있다. 전 세계 격자 점은 10개의 band로 구분되며 각각의 band에서 정의된 격자 점은 Table 3-1, Table 3-2와 같다.

Table 3-1 IGP definition (Band1~band4)

		Bits in Mask
Band 0		
180 W	75S, 65S, 55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N, 65N, 75N, 85N	1 to 28
175 W	55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N	29 to 51
170 W	75S, 65S, 55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N, 65N, 75N	52 to 78
165 W	55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N	79 to 101
160 W	75S, 65S, 55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N, 65N, 75N	102 to 128
155 W	55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N	129 to 151
150 W	75S, 65S, 55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N, 65N, 75N	152 to 178
145 W	55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N	179 to 201
Band 1		
140 W	85S, 75S, 65S, 55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N, 65N, 75N	1 to 28
135 W	55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N	29 to 51
130 W	75S, 65S, 55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N, 65N, 75N	52 to 78
125 W	55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N	79 to 101
120 W	75S, 65S, 55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N, 65N, 75N	102 to 128
115 W	55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N	129 to 151
110 W	75S, 65S, 55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N, 65N, 75N	152 to 178
105 W	55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N	179 to 201
Band 2		
100 W	75S, 65S, 55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N, 65N, 75N	1 to 27
95 W	55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N	28 to 50
90 W	75S, 65S, 55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N, 65N, 75N, 85N	51 to 78
85 W	55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N	79 to 101
80 W	75S, 65S, 55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N, 65N, 75N	102 to 128
75 W	55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N	129 to 151
70 W	75S, 65S, 55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N, 65N, 75N	152 to 178
65 W	55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N	179 to 201
Band 3		
60 W	75S, 65S, 55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N, 65N, 75N	1 to 27
55 W	55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N	28 to 50
50 W	85S, 75S, 65S, 55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N, 65N, 75N	51 to 78
45 W	55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N	79 to 101
40 W	75S, 65S, 55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N, 65N, 75N	102 to 128
35 W	55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N	129 to 151
30 W	75S, 65S, 55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N, 65N, 75N	152 to 178
25 W	55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N	179 to 201
Band 4		
20 W	75S, 65S, 55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N, 65N, 75N	1 to 27
15 W	55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N	28 to 50
10 W	75S, 65S, 55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N, 65N, 75N	51 to 77
5 W	55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N	78 to 100
0	75S, 65S, 55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N, 65N, 75N, 85N	101 to 128
5 E	55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N	129 to 151
10 E	75S, 65S, 55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N, 65N, 75N	152 to 178
15 E	55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N	179 to 201

Table 3-2 IGP definition (Band1~band4)

Band 5		
20 E	75S, 65S, 55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N, 65N, 75N	1 to 27
25 E	55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N	28 to 50
30 E	75S, 65S, 55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N, 65N, 75N	51 to 77
35 E	55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N	78 to 100
40 E	85S, 75S, 65S, 55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N, 65N, 75N	101 to 128
45 E	55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N	129 to 151
50 E	75S, 65S, 55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N, 65N, 75N	152 to 178
55 E	55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N	179 to 201
Band 6		
60 E	75S, 65S, 55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N, 65N, 75N	1 to 27
65 E	55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N	28 to 50
70 E	75S, 65S, 55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N, 65N, 75N	51 to 77
75 E	55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N	78 to 100
80 E	75S, 65S, 55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N, 65N, 75N	101 to 127
85 E	55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N	128 to 150
90 E	75S, 65S, 55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N, 65N, 75N, 85N	151 to 178
95 E	55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N	179 to 201
Band 7		
100 E	75S, 65S, 55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N, 65N, 75N	1 to 27
105 E	55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N	28 to 50
110 E	75S, 65S, 55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N, 65N, 75N	51 to 77
115 E	55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N	78 to 100
120 E	75S, 65S, 55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N, 65N, 75N	101 to 127
125 E	55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N	128 to 150
130 E	85S, 75S, 65S, 55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N, 65N, 75N	151 to 178
135 E	55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N	179 to 201
Band 8		
140 E	75S, 65S, 55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N, 65N, 75N	1 to 27
145 E	55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N	28 to 50
150 E	75S, 65S, 55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N, 65N, 75N	51 to 77
155 E	55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N	78 to 100
160 E	75S, 65S, 55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N, 65N, 75N	101 to 127
165 E	55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N	128 to 150
170 E	75S, 65S, 55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N, 65N, 75N	151 to 177
175 E	55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N	178 to 200
Band 9		
60 N	180W, 175W, 170W, ..., 165E, 170E, 175E	1 to 72
65 N	180W, 170W, 160W, ..., 150E, 160E, 170E	73 to 108
70 N	180W, 170W, 160W, ..., 150E, 160E, 170E	109 to 144
75 N	180W, 170W, 160W, ..., 150E, 160E, 170E	145 to 180
85 N	180W, 150W, 120W, ..., 90E, 120E, 150E	181 to 192
Band 10		
60 S	180W, 175W, 170W, ..., 165E, 170E, 175E	1 to 72
65 S	180W, 170W, 160W, ..., 150E, 160E, 170E	73 to 108
70 S	180W, 170W, 160W, ..., 150E, 160E, 170E	109 to 144
75 S	180W, 170W, 160W, ..., 150E, 160E, 170E	145 to 180
85 S	170W, 140W, 110W, ..., 100E, 130E, 160E	181 to 192

위와 같이 정의된 격자 점에 대하여 SBAS에서는 메시지를 생성하여 사용자에게 제공하는데, 전리층 관련 메시지는 Type 18, 26 이 있다. 18번 메시지는 정의된 격자 점 중에서 현재 시스템에서 제공되는 보정정보가 어떤 격자 점에 대한 것인지 알려주는 메시지이다. Figure 3-7은 18번 메시지의 구조를 나타낸 그림이다.

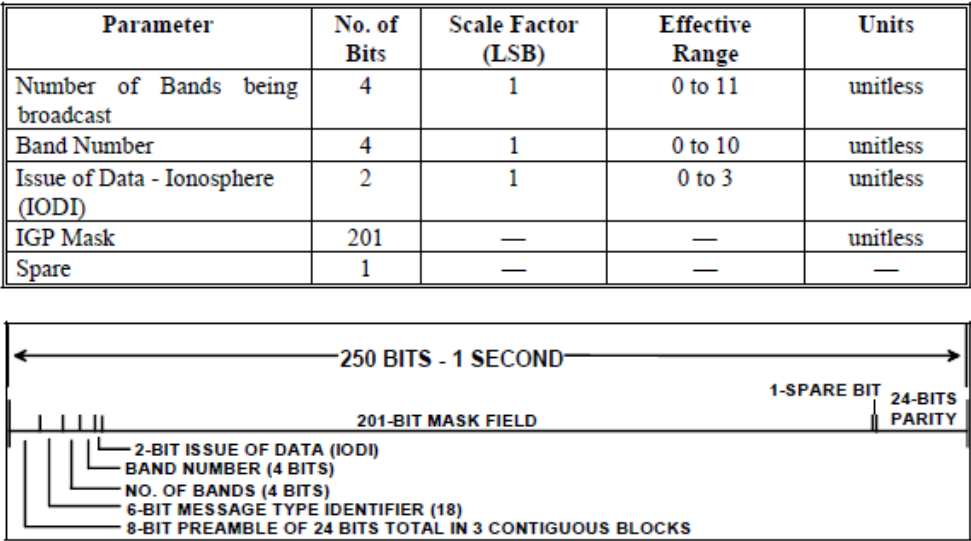


Figure 3-7 SBAS Message type 18

26번 메시지에서는 정의된 격자 점에 대하여 수직 전리층 보정정보 값과 그에 대한 오차수준인 GIVE 값을 제공한다. Figure 3-8은 SBAS 메시지 26번에 대한 구조를 나타낸 그림이다.

Parameter	No. of Bits	Scale Factor (LSB)	Effective Range	Units
Band Number	4	1	0 to 10	unitless
Block ID	4	1	0 to 13	unitless
For Each of 15 Grid Points	13	—	—	—
IGP Vertical Delay Estimate	9	0.125	0 to 63.875	meters
Grid Ionospheric Vertical Error Indicator (GIVEI)	4	1	0 to 15	unitless
IODI	2	1	0 to 3	unitless
Spare	7	—	—	—

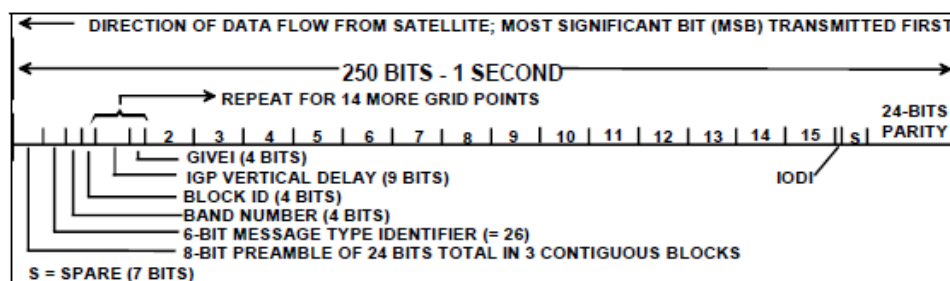


Figure 3-8 SBAS Message type 26

SBAS의 전리층 메시지는 제공하고자 하는 격자점의 수가 몇 개인지에 따라서 결정이 된다. 서비스를 제공하고자 하는 영역의 크기가 넓으면 넓을 수록 더 많은 격자점을 제공한다. Figure 3-9은 WAAS의 전리층 격자점 예시이며, Figure 3-10은 EGNOS의 격자점, Figure 3-11은 MSAS 격자점 예시이다.

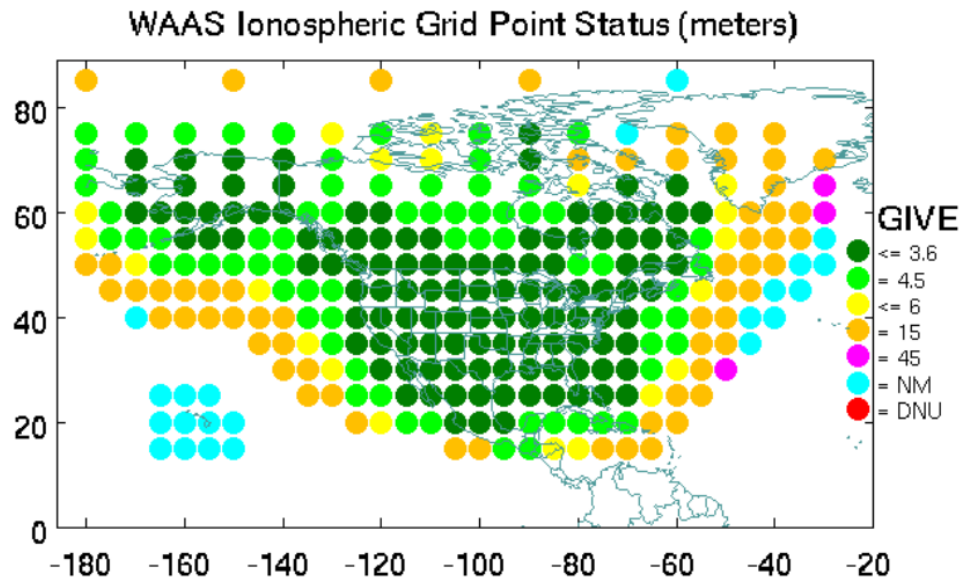


Figure 3-9 WAAS IGP example

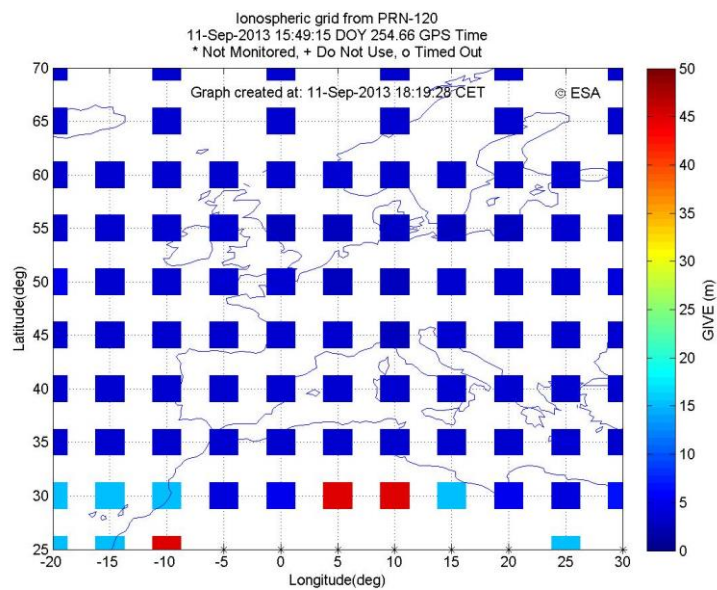


Figure 3-10 EGNOS IGP example

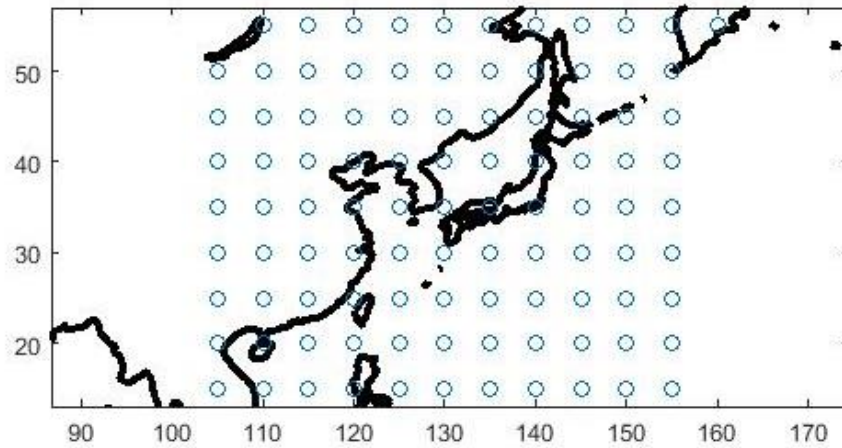


Figure 3-11 MSAS IGP example

2. 사용자 알고리즘

사용자는 SBAS 메시지로부터 앞서 설명한 예시와 같이 여러 격자점에 대한 보정정보, 무결성 정보를 제공 받는다. 전달 받은 정보를 바탕으로 사용자는 사용자가 바라보는 위성이 지나는 전리층 통과 점에 대한 의사거리 보정정보와 무결성 정보를 계산한다. 사용자 IPP 주변 격자점들을 찾고, 그 격자점들로부터 보간을 수행하여 보정정보, 무결성 정보를 얻게 되는데, Figure 3-12은 사용자 보간 알고리즘과 관련된 개념도이다.

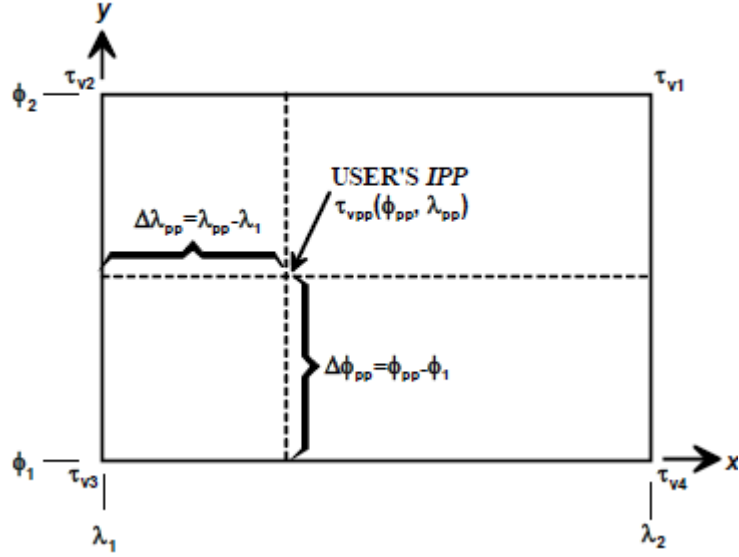


Figure 3-12 User ionospheric delay interpolation algorithm

위 그림과 같이 IPP 주변 격자점 4개로부터 보간을 수행하며 다음은 보간 식을 나타낸 것이다.

$$\tau_{vpp}(\phi_{pp}, \lambda_{pp}) = \sum_{i=1}^4 W_i(x_{pp}, y_{pp}) \tau_{vi} \quad (3-36)$$

$$W_1 = x_{pp} y_{pp}$$

$$W_2 = (1 - x_{pp}) y_{pp}$$

$$W_3 = (1 - x_{pp})(1 - y_{pp})$$

$$W_4 = x_{pp}(1 - y_{pp})$$

$$\Delta \lambda_{pp} = \lambda_{pp} - \lambda_1$$

$$\Delta\phi_{pp} = \phi_{pp} - \phi_1$$

$$x_{pp} = \frac{\Delta\lambda_{pp}}{\lambda_2 - \lambda_1}$$

$$y_{pp} = \frac{\Delta\phi_{pp}}{\phi_2 - \phi_1}$$

4장. IFB 추정 알고리즘

1. IFB 추정 원리

IFB는 L1, L2 측정치를 차분하면서 발생하는 값으로 전리층 지연량과 직접적인 연관을 갖게 된다. Figure 4-1은 IFB값이 전리층 지연 측정치에 미치는 영향을 나타낸 개념도이다. 각각의 위성, 수신기에 따라 다른 바이어스를 가지며 수집되는 측정치에 영향을 주게 된다.

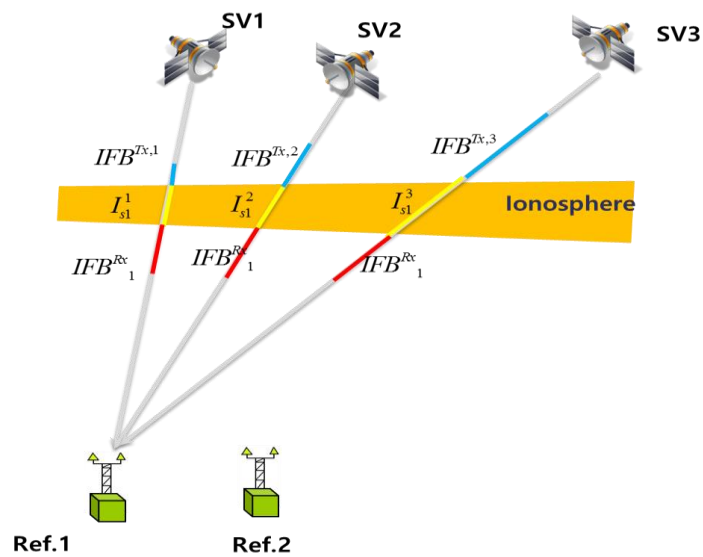


Figure 4-1 IFB effect in slant ionospheric delay measurement

이를 식으로 표현하면 아래와 같다.

$$I_{meas} = I - IFB^{Tx} + IFB^{Rx} \quad (4-1)$$

$$IFB^{Tx} = \frac{1}{\gamma - 1} (b_{\rho 2}^{Tx} - b_{\rho 1}^{Tx}) \quad (4-2)$$

$$IFB^{Rx} = \frac{1}{\gamma - 1} (b_{\rho 2}^{Rx} - b_{\rho 1}^{Rx}) \quad (4-3)$$

I_{meas} : Ionospheric delay measurement

I : Real ionospheric delay

IFB^{Tx} : Satellite IFB

IFB^{Rx} : Receiver IFB

위 식은 경사 전리층 지연에 대하여 표시된 식이며 이를 수직 전리층에 대한 식으로 변환하면 아래와 같다.

$$I_{V, meas} = I_V - \frac{IFB^{Tx}}{Q} + \frac{IFB^{Rx}}{Q} \quad (4-4)$$

Figure 4-2는 수직 전리층으로 변환했을 때의 지연량을 나타낸 개념도이다.

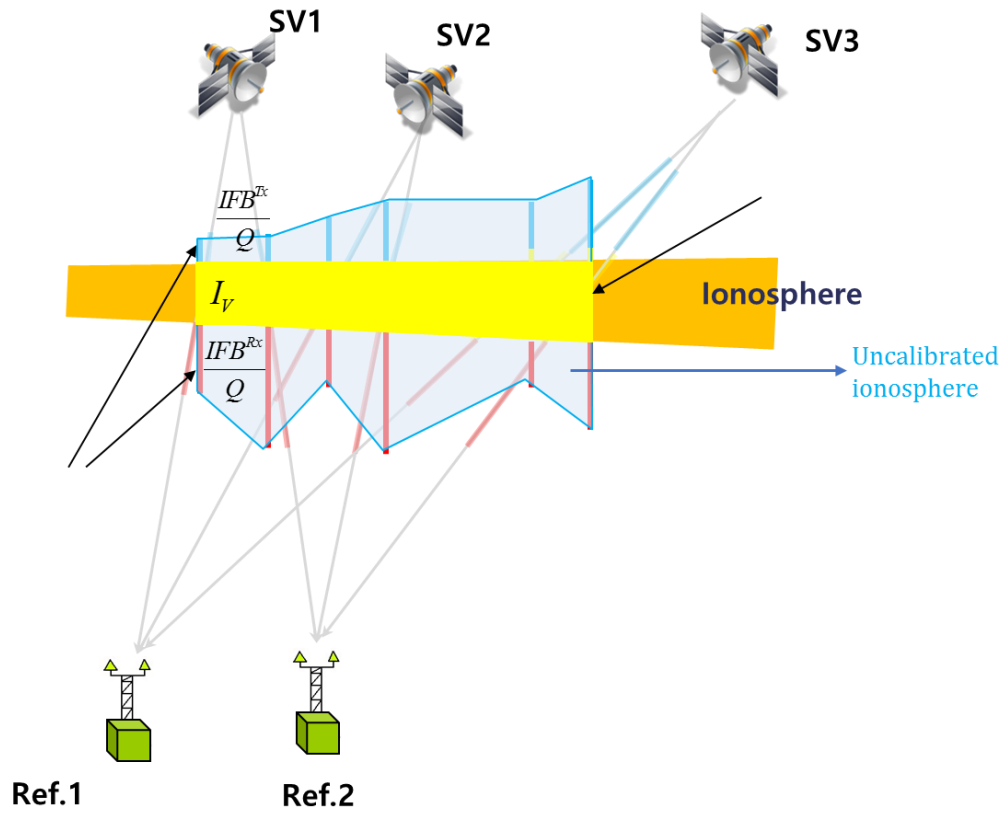


Figure 4-2 IFB effect in vertical ionospheric delay measurement

IFB를 보정하지 않는 경우, 노란색으로 표시된 실제 지연량이 아니라 파란색으로 표시된 위성 IFB, 빨간색으로 표시된 수신기 IFB 값도 함께 포함되어 측정이 되며 실제 smooth한 전리층 형상과는 달리 불규칙한 형상의 전리층 지연을 얻게 된다.

1) IFB 추정의 기본 가정

IFB값은 여러 기준국으로부터 수집된 전리층 지연 측정치로부터 추정이 되는데, 두 가지의 기본 가정을 두고 시작이 된다.

① Smooth ionosphere

첫 번째 가정은 전리층이 smooth한 형태의 모양을 갖는다고 가정하는 것이다. 일반적으로 전리층 폭풍과 같이 전리층이 급변하는 상황이 아닌 경우, smooth한 형상을 지닌다. 즉, 가까운 IPP 에서의 전리층 지연 값은 비슷한 값을 지닌다. 이러한 전리층 지연의 특성에 맞도록 인접한 측정치들간의 수직 전리층 지연 오차 차이가 줄어들 수 있도록 추정을 한다. Figure 4-2에 서와 같이 IFB 값이 포함되어 있는 경우에는 smooth한 형상이 아니며 인접한 측정치들 간에도 큰 차이를 보일 수 있다. 일반적으로 이러한 가정은 실제 전리층 지연의 형상과 크게 다르지 않으며, 특히 전리층 활동이 적은 시간대에서는 공간상의 변화가 아주 작게 나타난다.

이러한 전리층의 smooth함을 가정하여 IFB 추정 시에 전리층 지연에 의한 파트를 smooth한 형상으로 모델링함으로써 IFB를 분리하여 추정하게 된다. 이 때, 전리층을 모델링하는 방법에 따라서 여러 가지 방법이 존재할 수 있다. Ma 는 격자 형식으로 영역을 구분하고 한 격자 안에서는 수직 전리층 지연 값이 같다고 두어 격자의 수직 전리층 지연 값과 IFB 값을 추정하는 알고리즘을 제안하였다 [25, 26]. 이외의 알고리즘으로는 본 논문에서도 사용된 spherical harmonics 기반의 모델링 기법이 존재한다 [21, 64].

② Constant IFB

두 번째 가정은 IFB 값이 constant라고 두는 것이다. IFB 값은 시간에 따라 매우 천천히 변한다고 알려져 있으며, 선행 연구에서는 이를 활용하여 수 시간 ~ 1일까지 IFB 값을 constant로 두고 추정을 하였다 [19, 24-30].

2) IFB 추정 식

본 연구에서는 spherical harmonics로 모델링하여 IFB 값을 추정하였다. 식 (4-4)와 같이 표현된 수직 전리층 지연 측정치에서 실제 수직 전리층 지연량인 I_V 값을 spherical harmonics를 적용하여 모델링할 경우 식은 아래와 같다.

$$I_{V, meas} = \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^n P_{nm}(\sin(\phi)) \cdot \{C_{nm} \cdot \cos(ml) + S_{nm} \cdot \sin(ml)\} - \frac{IFB^{Tx}}{Q} + \frac{IFB^{Rx}}{Q} \quad (4-5)$$

l : local time of measurement

기준국의 수가 p 개, 위성의 수가 q 개 라고 할 때, 수집되는 모든 측정치들을 바탕으로 구성되는 측정치 벡터는 아래와 같다.

$$z = \begin{bmatrix} I_{V, meas, 1}^1 & \cdots & I_{V, meas, 1}^q & \cdots & I_{V, meas, p}^1 & \cdots & I_{V, meas, p}^q \end{bmatrix}^T \quad (4-6)$$

$I_{V, meas, i}^j$: 기준국 i 에서 수집된 위성 j 에 대한 수직 전리층 지연 측정치

추정해야 할 변수는 수직 전리층에 해당하는 부분을 모델링 하기 위한

spherical harmonics 계수와 각각의 위성, 수신기의 IFB 값이다. 이를 식으로 표현하면 아래와 같다.

$$x = \begin{bmatrix} x_{SH}^T & x_{IFB}^T \end{bmatrix}^T \quad (4-7)$$

x_{SH} : spherical harmonics coefficient vector

$$x_{SH} = \begin{bmatrix} C_{00} & C_{10} & S_{10} & \cdots & S_{n_{\max} n_{\max}} & S_{n_{\max} n_{\max}} \end{bmatrix}^T \quad (4-8)$$

x_{IFB} : Satellite and receiver IFB vector

$$x_{IFB} = \begin{bmatrix} IFB^{Tx,1} & \cdots & IFB^{Tx,q} & IFB_1^{Rx} & \cdots & IFB_p^{Rx} \end{bmatrix}^T \quad (4-9)$$

측정치, 상태 변수가 위와 같을 때, 측정치와 상태 변수와의 관계를 나타내는 관측 행렬은 아래와 같다.

$$z = Hx \quad (4-10)$$

$$H = \begin{bmatrix} H_1^1 \\ \vdots \\ H_p^q \end{bmatrix} \quad (4-11)$$

H_i^j : observation matrix for the measurement obtained by i-th reference station and j-th satellite

$$H_i^j = \begin{bmatrix} H_{SH,i}^j & H_{IFB,i}^j \end{bmatrix} \quad (4-12)$$

$H_{SH,i}^j$: matrix corresponding to spherical harmonics coefficient

$H_{IFB,i}^j$: matrix corresponding to IFBs

$$H_{SH,i}^j = \begin{bmatrix} P_{nm}(\sin(\phi_i^j)) \cdot \cos(0 \cdot l_i^j) & \cdots & P_{nm}(\sin(\phi_i^j)) \cdot \cos(n_{\max} \cdot l_i^j) & P_{nm}(\sin(\phi_i^j)) \cdot \sin(n_{\max} \cdot l_i^j) \end{bmatrix}$$

(4-13)

$$H_{IFB,i}^j = \begin{bmatrix} \cdots & -\frac{1}{Q_i^j} & \cdots & \cdots & \frac{1}{Q_i^j} & \cdots \end{bmatrix} \quad (4-14)$$

위 추정 식은 간단한 표현을 위하여 1 epoch의 측정치에 대해서만 나타낸 것이며 실제 추정을 여러 epoch 측정치를 누적하여 수행된다. 이때 IFB 값은 상수로 두게 되므로 추정해야 할 변수가 늘어나지 않는다. 전리층을 모델링하는 파라미터는 시간 구간별로 따로 두어야 하므로 시간을 늘릴수록 상태변수가 늘어나게 된다. 수 시간 이상의 충분한 측정치를 누적한 후 각 구간의 전리층 모델링 파라미터와 IFB 값을 weighted least square 기법으로 구하게 된다.

추정 시 저장각 측정치의 오차가 추정 정확도를 떨어트리는 것을 막기 위하여 mask angle은 10도로 설정 되었다. 그리고 각 측정치마다의 가중치는 측정치가 수집되는 local time 기준으로 할당하였다. 추정식에서 보았듯이 IFB에 대해서만 관련되는 측정치가 따로 있는 것이 아니라 전리층 지연이 같이 포함된 측정치로부터 전리층 지연, IFB를 분리하여 추정을 하게 된다. 즉, 전리층 지연에 대한 모델링 정확도는 직접적으로 IFB 추정에 영향을 미치게 된다. 전리층이 강한 낮 시간대에서는 전리층의 크기가 크고 공간, 시간상의 변화도 밤 시간대에 비하여 훨씬 크게 발생한다. 이러한 전리층의 크기와 변화는 전리층 모델링 정확도를 떨어트리게 되며, 전리층 모델링 정확도가 떨어지는 만큼 IFB 추정에 오차를 발생시키게 된다. 따라서 전리층 모델링 정확도가 떨어지는 시간대의 측정치에 대해서는 사용을 하지 않는 방법이 제안된바 있고, 아래와 같이 낮은 가중치를 주는 방법이 제안된바 있다 [28]. 측정치를 추정에 사용을 하지 않게 되는 경우, 기준국 네트워크 크기가 작으면 특정 위성들에 대한 측정치가 전혀 수집되지 않을 수 있기

때문에 본 연구에서는 가중치를 낮게 주는 방법을 적용하였다.

$$W(t) = 1 + \frac{A}{2} \cdot \left(\cos\left(\frac{\pi t}{12}\right) - 1 \right) \quad (4-15)$$

t : local time

A값이 클수록 전리층 활동이 활발한 시간에 대하여 가중치를 더 낮게 주는 가중치 함수이며 본 논문에서는 0.9의 값을 사용하였다. Figure 4-3는 위 weight 함수를 나타낸 그래프이다.

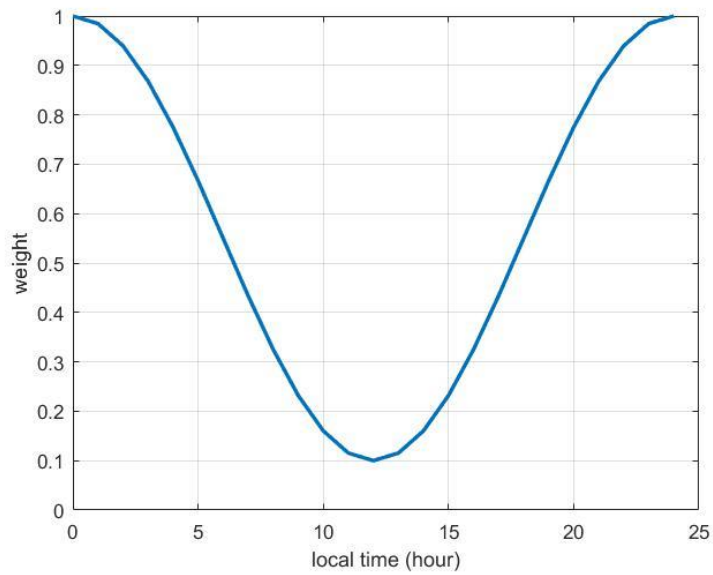


Figure 4-3 weighting function for IFB estimation

2. 좁은 네트워크의 IFB 추정 성능 개선 방안

1) 좁은 네트워크의 위성 IFB 추정 필요성

Xue는 네트워크 크기에 따라서 IFB의 추정 정확도가 달라짐을 확인한 바 있다 [19]. 네트워크 크기가 작아질수록 추정 정확도가 떨어지게 되는데, 그럼에도 불구하고 좁은 네트워크만을 이용하여 위성 IFB를 추정해야 할 필요성이 존재한다. 대표적인 예가 본 논문에서 연구 대상으로 다루고 있는 SBAS이다. SBAS는 구축하고자 하는 서비스 대상 영역에 분포한 수신기들로 측정치를 수집하여 보정정보를 생성한다. 일반적으로 구축하는 나라에만 수신기가 분포되어 있는 경우가 많으며 이 경우 지역적인 기준국 분포만을 활용하여 IFB 값을 추정해야 한다. 특히 우리나라 같은 경우 기준국의 배치가 위도, 경도 약 5° 안에 모든 기준국이 분포하고 있다.

좁은 네트워크에서의 위성 IFB 보상을 위하여 이전 연구에서는 따로 위성 IFB 값을 추정하지 않고 방송 궤도력에서 제공하는 값을 사용한 바 있다 [15, 65-67]. 위성 IFB 값을 따로 추정하지 않는 경우에는 GPS 위성의 방송 궤도력에서 제공되는 TGD (Timing Group Delay) 값을 이용하여 보상을 할 수 있다. 그러나 TGD값은 GPS의 P코드 측정치에 맞춰진 값으로 C/A 코드 측정치에 적용 시 $-1 \sim 1\text{m}$ 의 오차가 존재한다. 즉, 전리층 지연 오차에서는 대략 $-1.5 \sim 1.5\text{ m}$ 수준의 오차가 발생할 수 있다.

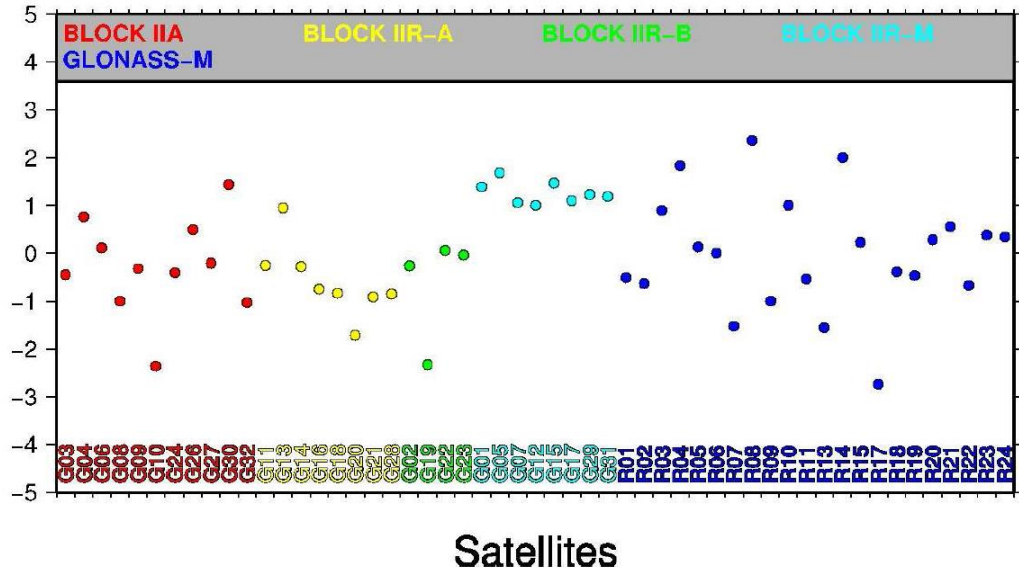


Figure 4-4 IFB error when using broadcasted TGD

Xue의 연구에서는 좁은 기준국 네트워크에서도 위성 IFB 값을 추정하였으나, 좁아질수록 추정 정확도가 저하 된다는 결과만 제시하였으며 개선 방안에 대해서는 제시하지 못했다 [19].

IFB의 후처리 분석이나 검증을 위한 값으로는 CODE, JPL과 같은 IGS 기관들에서 제공하는 산출물이 있다 [68, 69]. 해당 기관에서는 일별 또는 월별로 GPS 위성들과 IGS 기준국들에 대한 IFB 값을 추정하여 제공해주고 있다. 후처리 결과이긴 하지만 IFB의 변화가 일별로 크게 나타나지 않기 때문에 과거 추정 결과를 현재에 적용하는 것이 가능하다고 판단될 수 있으나, 이는 IRSB (Inter-Receiver Satellite Bias) 로 인해 한계가 존재한다. 현재 후처리로 전세계 네트워크를 활용하여 정밀하게 추정되는 값이 IGS 기관에서 제공되고 있으나 이를 그대로 적용하는 경우 IRSB로 인한 오차가 발생

한다. IRSB는 같은 위성에 대해서도 수신기 마다 다른 바이어스가 발생하는 것을 지칭하는 말이다. GPS 위성 신호에는 발생하는 signal deformation이 발생하는데, 이러한 signal deformation에 대하여 각 수신기마다 발생시키는 바이어스 값이 달라지게 된다. 이러한 IRSB는 수신기의 correlator setting에 크게 영향을 받게 되므로 수신기 기종에 따라서 다르게 발생하며, 같은 수신기 기종 간에도 firmware가 다른 경우에는 다른 바이어스가 발생할 수 있다 [70-72]. 이러한 IRSB는 측정치 타입에 따라서도 다른 크기를 갖는데, C/A 코드 측정치의 경우 수십 cm 이상의 바이어스를 발생시킬 수도 있다. 특히 수신기의 멀티패스 감소 옵션이 켜진 경우 큰 바이어스 차이를 보인다. 기준국 수신기의 경우 멀티패스 감소 옵션이 켜진 상태로 운영되는 경우가 많으며 큰 IRSB를 갖게 된다.

IRSB는 zero-base 테스트를 통하여 확인해볼 수 있다. 다음은 Trimble NetR9 수신기와 Novatel DLV3 수신기를 활용하여 zero-baseline 테스트를 수행한 결과이다. Figure 4-5는 L1 의사거리 측정치에 대하여 원시 데이터로 수행한 결과이며, Figure 4-6는 hatch filter로 smoothing 된 측정치에 대하여 테스트한 결과이다. 원시 데이터에서는 큰 잡음으로 인해 바이어스가 잘 나타나지 않으나 필터링 된 측정치를 보면 어느 정도 수렴이 된 이후에도 바이어스를 나타내는 것을 볼 수 있다. 테스트에서는 30 cm 정도 수준까지 IRSB가 나타났으나 hauschild 는 최대 50 cm까지 발생할 수 있다는 결과를 제시하였다 [70-72]. P 코드 측정치에 대해서는 C/A코드보다는 작은 IRSB 값을 보이지만 최대 20 cm 수준의 IRSB 값을 보였다. 전리층 지연 측정치에는 각각의 바이어스가 $1/(\gamma-1)$ 배 곱해지고 더해지는 형태이므로 더 큰 측정치 오차를 발생 시킬 수 있다.

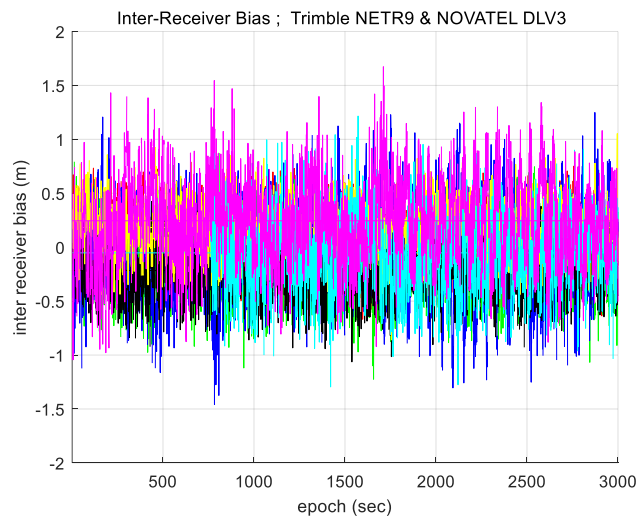


Figure 4-5 zero-baseline test between trimble and novatel receiver (raw measurement)

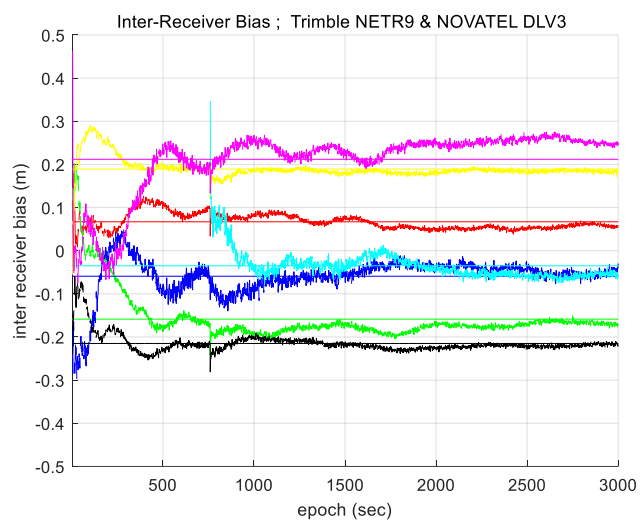


Figure 4-6 zero-baseline test between trimble and novatel receiver (hatch filter measurement)

현재 제공되고 있는 정밀 IFB 데이터는 전 세계의 다양한 수신기를 모두 활용하여 추정하게 되므로 IRSB에 대한 고려가 되고 있지 않으며 특정 수신기에 정확히 맞는 바이어스 값을 제공해주지 못한다. 따라서 각각의 수신기에 맞는 바이어스를 정확히 추정해주는 것이 필요하다.

2) 좁은 네트워크의 위성 IFB 추정 성능 저하 요인

CODE와 같이 정밀 데이터를 제공하는 IGS 기관들에서는 전세계에 분포한 기준국 네트워크를 활용하여 IFB 값을 추정한다. 기준국의 배치는 추정 성능에 직접적인 영향을 주며 네트워크 크기가 좁아질수록 성능 저하가 발생하게 된다 [19].

네트워크 크기에 따라 성능저하가 발생하는 원인은 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 첫 번째 요인은 측정치 수이다. 기준국 네트워크가 전세계에 걸쳐 존재하는 경우 가용한 기준국들의 수가 많고 따라서 충분히 많은 측정치를 확보할 수 있다. Figure 4-7는 전세계에 분포한 IGS 기준국들의 분포를 나타낸 것이다 [73].



Figure 4-7 IGS reference station map

IGS 기준국은 2017년 11월 기준으로 전세계 500개 이상의 기준국들이 분포하고 있다. 기준국 네트워크가 좁은 경우에는 이와 같이 많은 기준국을 모두 활용하지 못하고 훨씬 더 적은 측정치를 활용하여 추정을 하게 되므로 추정 성능의 저하가 발생하게 된다.

좁은 네트워크에서의 두 번째 성능 저하 요인은 측정치가 수집되는 시간의 편중된 분포이다. 우리나라와 같이 네트워크가 좁은 경우 특정 위성에 대한 가시성이 확보되는 시간은 비슷하다. Figure 4-8는 이후 테스트에서 사용되는 한국의 기준국 네트워크를 나타낸 그림이다. 제주(CHJU), 강화

(GANH), 진주(JIN), 강릉(KANR), 세종(SEJN) 기준국이 사용되었으며 각각의 위치를 빨간 삼각형으로 표시하였다.

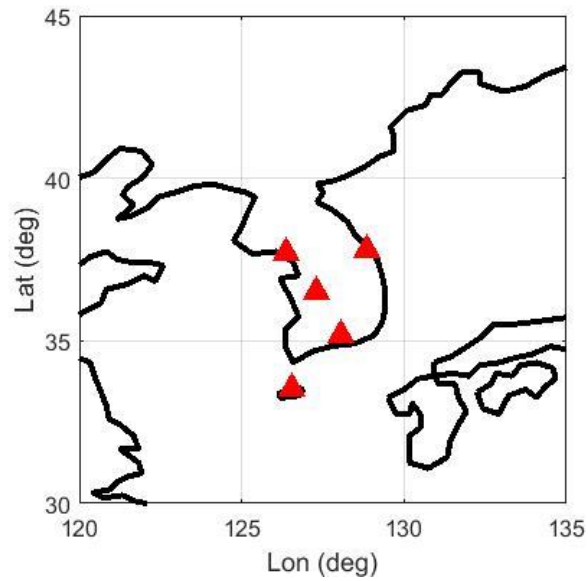


Figure 4-8 reference stations in Korea(CHJU, GANH, JINJ, KANR, SEJN)

Figure 4-9, Figure 4-10, Figure 4-11, Figure 4-12는 위성 별로 가시성이 확보되는 시간을 확인하기 위하여 각 기준국에서의 양각을 나타낸 것이다.

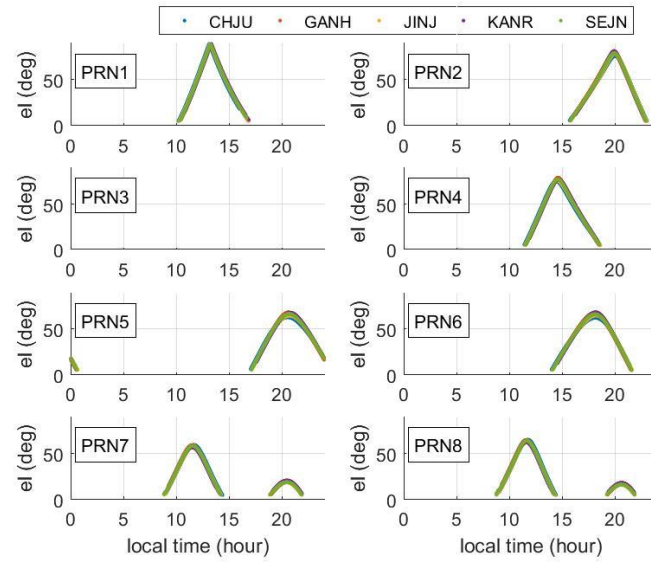


Figure 4-9 Elevation angel versus local time for each Korean reference station (PRN1~PRN8)

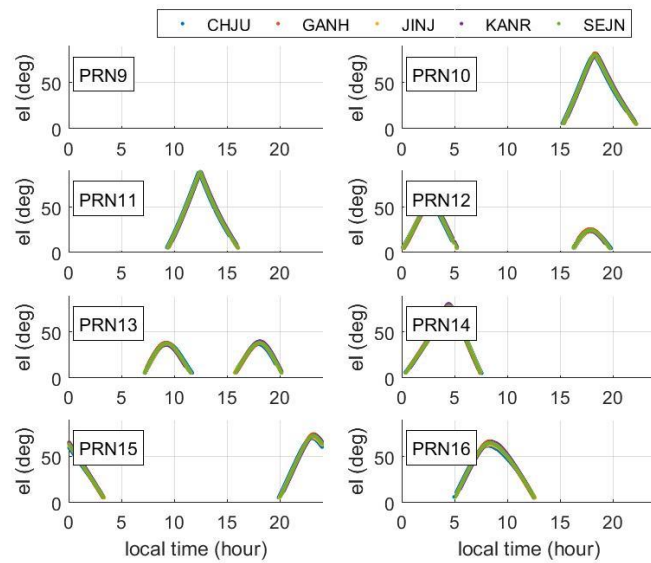


Figure 4-10 Elevation angel versus local time for each Korean reference station (PRN9~PRN16)

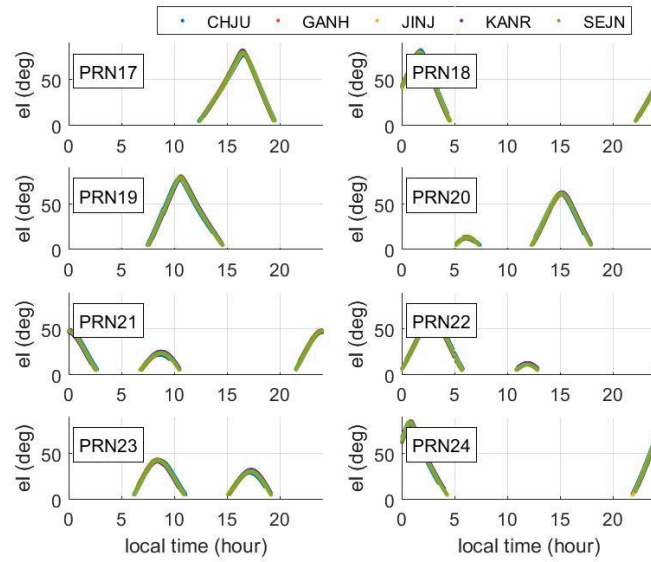


Figure 4-11 Elevation angel versus local time for each Korean reference station (PRN17~PRN24)

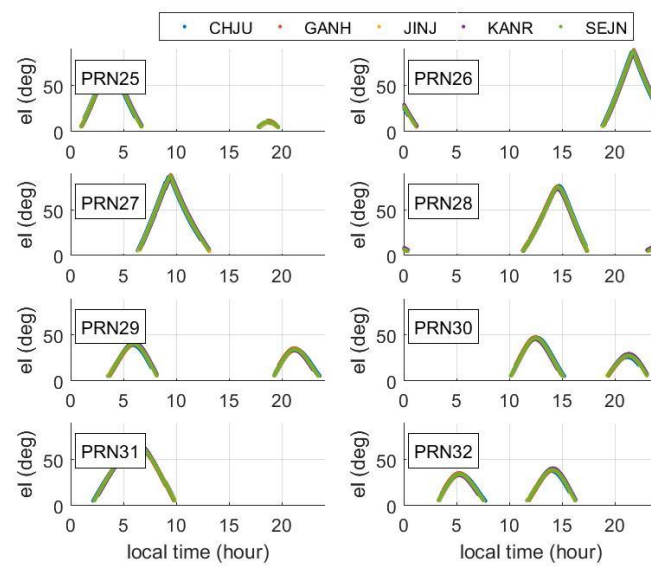


Figure 4-12 Elevation angel versus local time for each Korean reference station (PRN25~PRN32)

각각의 그림에서 확인할 수 있듯이 한반도 기준국의 배치가 넓지 않으므로 가시성이 확보되는 시간이 거의 유사하게 나타나 그래프가 겹쳐지는 것을 볼 수 있다. 위성 별로 측정치가 수집되는 시간이 특정 시간에 편중되어 있는 경우, 전리층이 강한 시간대에만 편중되어 측정치가 수집되는 위성들도 존재하며 이 위성들의 추정 정확도가 떨어지는 문제가 존재한다. 앞서 언급하였듯이 전리층이 강한 시간대에서는 전리층 모델링 정확도가 떨어지게 되고 이로 인해 해당 위성에 대한 IFB 정확도가 저하된다. 추정 시 이를 고려하여 전리층 활동이 활발할 때 수집된 측정치들에 대해서는 가중치를 작게 주지만 낮 시간대에만 편중되어 측정치가 수집되는 위성의 경우 효과를 제대로 볼 수가 없고, 추정 정확도는 떨어진다.

3) 위성 IFB 추정 성능 개선 방안

앞서 언급되었던 좁은 네트워크의 위성 IFB 추정 성능 저하 요인은 적은 측정치의 수, 편중된 측정치 수집 시간 분포이다. 본 연구에서는 IFB 추정의 기본 가정 중 IFB를 constant로 두는 기간을 1일이 아닌 훨씬 더 긴 기간으로 확장함으로써 성능 개선을 할 수 있는 방법을 제안하고 검증해보았다.

이전까지 제안되었던 IFB 추정 연구들에서는 IFB를 constant로 두는 기간을 1일까지 두고 추정을 수행하였다 [19, 24-30]. 그러나 최근 연구에서 위성 IFB의 경우에는 이전에 알려진 것보다 훨씬 더 안정성을 가지며 천천히 변한다는 결과가 제시되었다 [30, 31]. Figure 4-13는 위성 IFB 값들을 나타낸 그래프 예시이다[31].

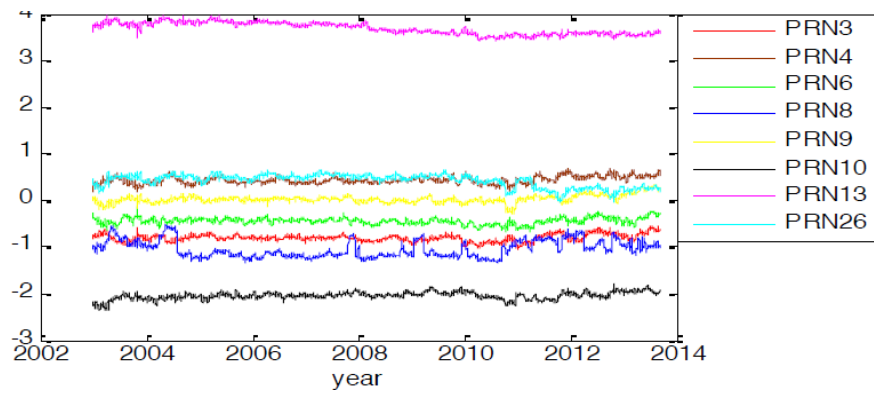


Figure 4-13 satellite IFB varication for 12 years (ns)

그리고 Figure 4-14은 위 그래프에 대하여 1달 단위로 평균 변화량을 계산하여 나타낸 그래프 예시이다[31].

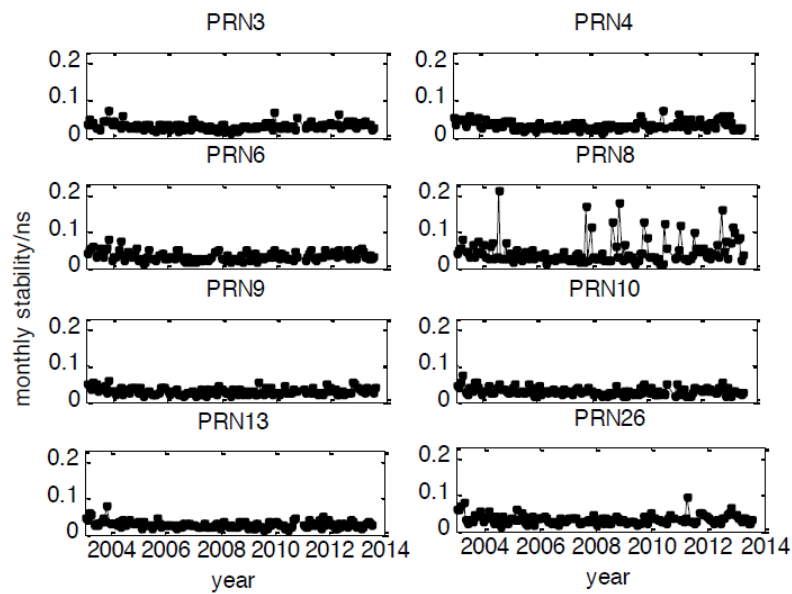


Figure 4-14 Annual change in satellite IFB

PRN 8번을 제외한 대부분의 위성이 10년이 넘는 기간 동안 거의 변하지 않는 값을 보이고 월별 평균 변화도 상당히 작은 값을 보임을 확인할 수 있다. PRN 8번의 경우 바이어스 관련 문제가 존재하는 것으로 알려진바 있다 [74]. 따라서 PRN 8번을 제외하고 나머지 위성들에 대하여 살펴보면 모두 연도별 변화가 0.1ns 이하로 나타났다.

본 연구에서는 이러한 위성 IFB의 수년이 장기간 안정성을 활용하여 좁은 네트워크의 IFB 추정 성능을 개선해보았다. 먼저 세종 기준국에 대하여 sky plot을 확인해보면 아래와 같다. Figure 4-15는 2014년 9월 1일 하루에 대하여 나타낸 sky plot이며 Figure 4-16는 3월 1일부터 9월 1일까지 1달 간격으로 sky plot을 겹쳐 그린 것이다.

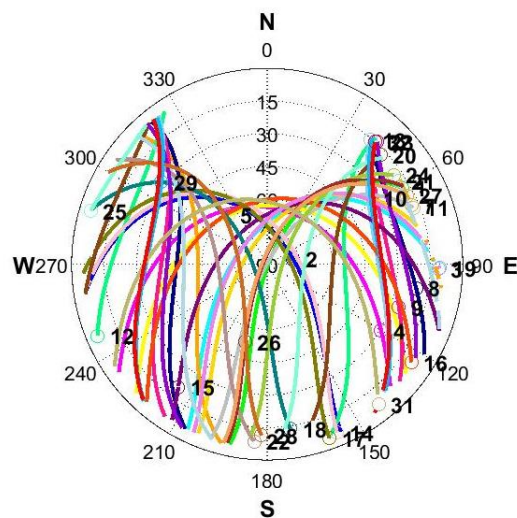


Figure 4-15 Skyplot for CHJU station on September 1, 2014

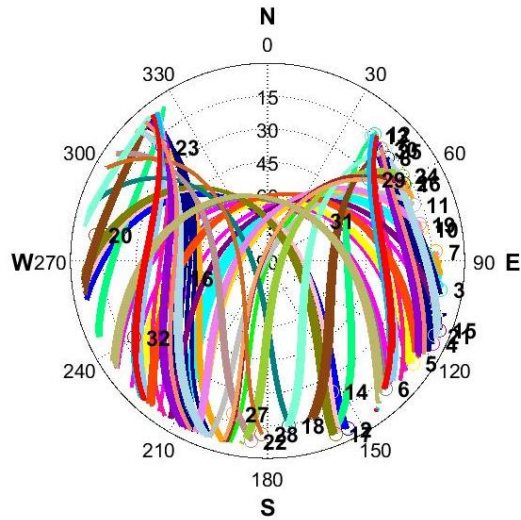


Figure 4-16 Skyplot for CHJU station from March 1 to September 1, 2014

위 그림에서 확인할 수 있듯이 몇 달의 시간이 지나도 sky plot 상에는 큰 변화가 없는 것을 볼 수 있다. GPS 위성은 ECEF 좌표계 상에서 거의 유사한 궤도를 지나며 시간이 지남에 따른 LOS (line of sight) 변화가 작다. 1일 그래프와 비교하여 각 위성의 sky plot은 약간씩 움직여서 선이 겹쳐지는 형태로 그래프가 나타난 것을 볼 수 있다.

Figure 4-17, Figure 4-18, Figure 4-19, Figure 4-20은 세종 기준국에 대하여 데이터 수집 날짜에 따라서 각 위성의 가시성이 확보되는 시간을 알아보기 위하여 위성의 양각을 나타낸 것이다.

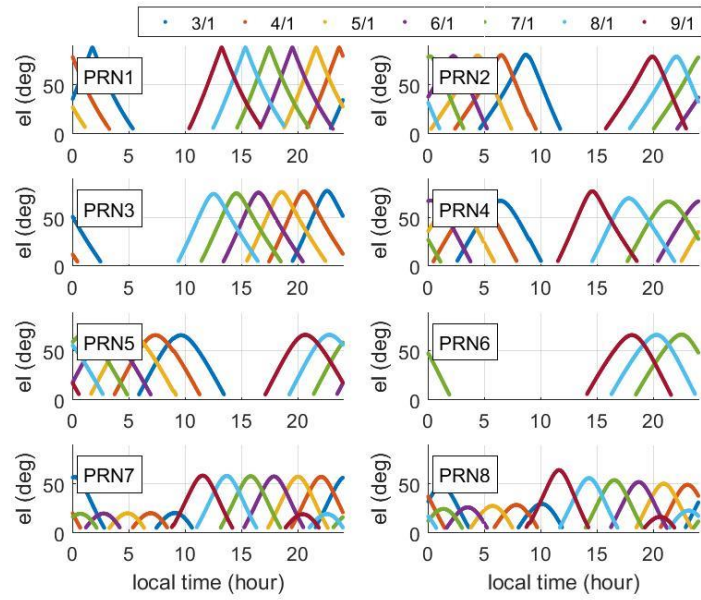


Figure 4-17 Elevation angle versus local time (7 month, PRN1~PRN8)

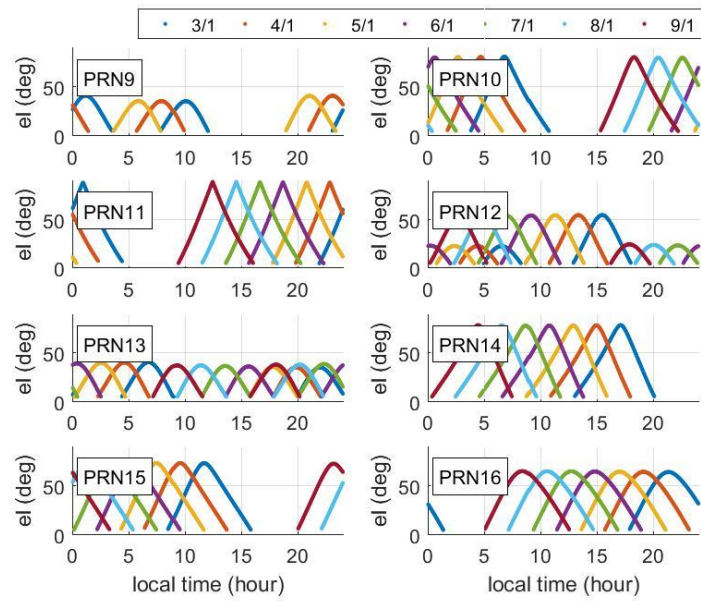


Figure 4-18 Elevation angle versus local time (7 month, PRN9~PRN16)

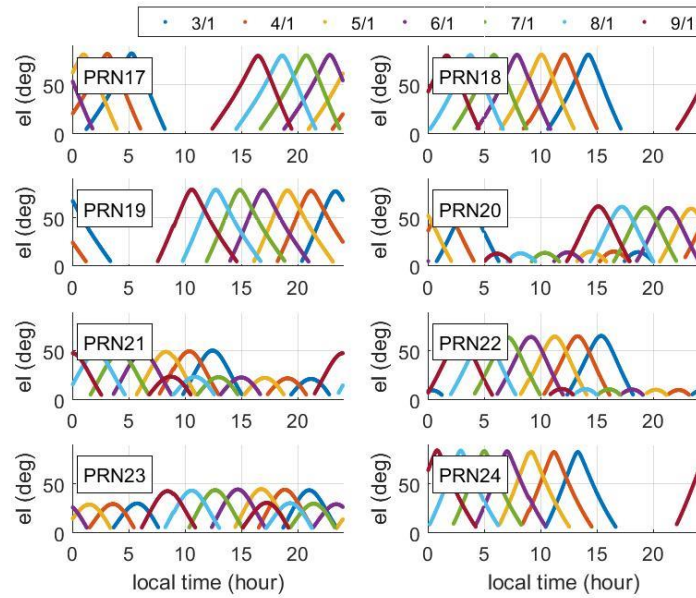


Figure 4-19 Elevation angle versus local time (7 month, PRN17~PRN24)

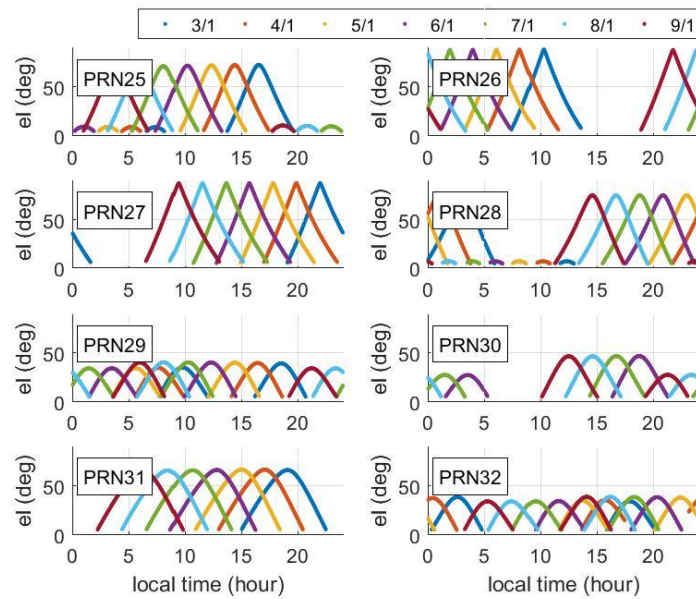


Figure 4-20 Elevation angle versus local time (7 month, PRN25~PRN32)

앞서 sky plot에서 몇 달이 시간이 지나도 GPS 궤적은 거의 일정한 현상을 확인하였다. 그러나 궤적이 일정하더라도 GPS 위성이 같은 위치를 지나가는 시간은 하루에 약 4분씩 변한다. GPS 위성 궤도의 주기는 약 11시간 58분이며, 이에 2배에 해당하는 23시간 56분은 24시간에 4분 모자라는 값이다. 따라서 하루에 약 4분씩 GPS 위성이 같은 지점을 지나가는 시간이 바뀌게 되고, 한 달이 지나면 약 2시간이 바뀌게 된다.

몇 달까지 IFB가 상수로 일정하다고 가정을 한다면 장기간의 측정치를 활용하여 추정되는 IFB 한 개당 가용한 측정치의 수를 늘릴 수가 있다. 그리고 하나의 위성에 대하여 측정치가 수집되는 local time 분포가 고르게 퍼질 수 있다. 특히, 전리층 활동이 강한 시간대에서만 측정치가 수집되었던 위성들에 대해서 추정 오차가 저하되는 현상을 개선시킬 수 있는 이점이 있다. 몇 달까지 IFB가 상수로 일정하다고 가정하는 경우 발생할 수 있는 성능 저하 요인은 실제 IFB 값이 변할 수 있다는 것이다. 그러나 앞서 제시한 선행 연구의 결과와 같이 대부분의 GPS 위성이 1년에 0.1ns 이하의 변화를 보이고 있으므로 실제 변화로 인한 오차는 작은 수준이 된다. 즉, 측정치 수의 증가, 측정치 수집 시간 분포의 변화로 인한 추정 성능 개선효과가 실제 IFB 변화로 인한 추정 성능 저하효과보다 크게 되어 추정 성능을 개선할 수 있다.

IFB 추정 기간을 늘리게 되는 경우 추정 식의 변화는 다음과 같다. 기본적인 측정치 모델에서는 큰 변화가 없다. 전리층 지연 측정치를 전리층 지연과 위성 IFB, 수신기 IFB에 대하여 나타내는 것은 동일하다. 위성 IFB는 모아진 측정치에 대하여 모두 일정한 값으로 들어간다고 가정했으므로 상태 변수에서 위성 IFB에 대한 항은 변하지 않는다. 달라지는 점은 전리층 지연과 수신기 IFB에 대한 추정 값이 늘어난다는 것이다. 전리층 지연에 대한 모델링은 시간 구간별로 항상 다르게 나타나므로 늘어난 시간만큼 해당 시

간 구간들을 모델링하는 파라미터들이 추가되어야 한다. 그리고 수신기 IFB의 경우에는 위성 IFB에 비하여 변화가 크다고 알려져 있다 [58]. 따라서 수신기 IFB 경우에는 서로 다른 날의 측정치에 대해서는 다른 값을 추정하도록 하였다.

3. IFB 추정 테스트 결과

1) 테스트 환경

본 연구에서 제시한 방법의 유효성을 검증하기 위하여 IFB 추정 테스트를 여러 가지 케이스로 구분하여 수행하고 결과를 검증하였다.

Table 4-1 IFB estimation test setting

Case	Region	Number of ref. stn.	Applying proposed method	Data used in estimation (DOY)
1	Global	35	X	244
2	Korea	5	X	244
3	Korea	5	O	60,91,121,152,182,213, 244

Case 1, 2는 기존의 방법대로 위성 IFB 추정시 1일 데이터만 활용했을 때, 기준국 네트워크에 따른 성능 변화를 확인하기 위하여 전 세계 기준국 네트워크 한국의 네트워크를 각각 활용하여 IFB를 추정을 한 경우이다. Case 3은 제안한 방법을 적용하여 한국의 기준국 네트워크로 긴 시간 동안

누적된 데이터를 활용하여 IFB 값을 추정하였고, case 1과 비교함으로써 성능 개선 효과를 검증하였다. Case 3에서는 7달의 기간 동안 1달간격으로 하루씩 수집된 데이터가 사용되었다. 기준국의 수는 전세계 네트워크, 한국의 기준국 네트워크가 7배 차이가 난다. 총 7일의 데이터를 사용함으로써 case 1, case 3에서 사용된 총 측정치 수는 유사한 수를 갖게 된다.

Figure 4-21, Figure 4-22는 각각 IFB 추정 시 사용된 전세계 기준국 네트워크, 한국의 기준국 네트워크를 나타낸 것이다.

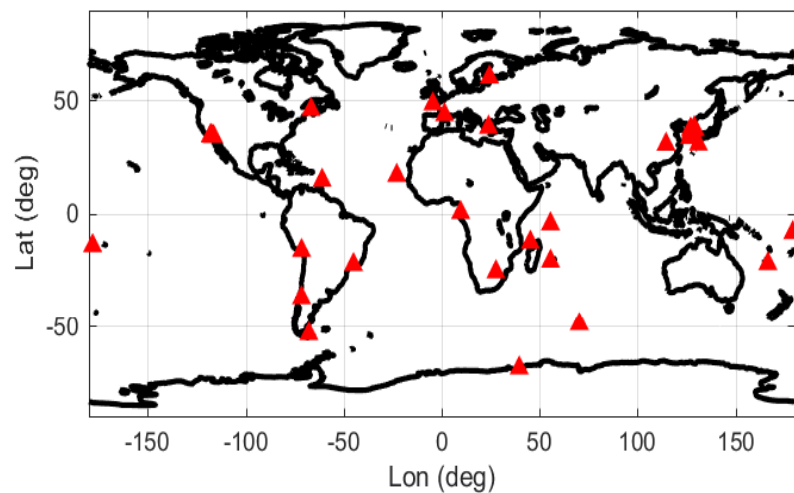


Figure 4-21 Global network

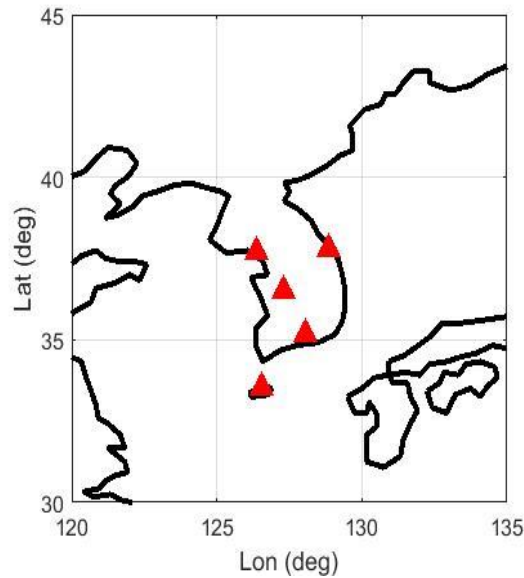


Figure 4-22 Korea Network

2) 검증 방법

기존의 IFB 추정 연구들에서는 IGS 기관에서 제공하는 후처리 결과들을 바탕으로 추정 성능을 평가하였다 [19, 24, 26, 64, 66, 75, 76]. 그러나 IRSB의 영향으로 IGS의 IFB 추정 결과물로는 정밀한 평가에 한계가 존재한다. 따라서 본 연구에서는 이를 대신할 수 있는 검증 방법을 제안하였다. 추정된 IFB를 이중주파수 항법해 계산에 적용하여 나타나는 위치 오차, 의사거리 잔차를 바탕으로 간접적으로 IFB의 정확도를 검증할 수 있다. 이때, 다른 오차들이 정밀하게 제거되지 않을 경우 검증 결과에 오차가 발생하여 신뢰성 없는 검증 결과가 나타날 수 있다. 따라서 IFB의 정확도에 중점을 두기 위하여 나머지 오차들은 가능한 정확하게 제거를 하여 검증을 수행하였다. 다음은 검증 방법을 나타낸 표이다.

Table 4-2 Error removal method

Error source	Error removal method
Satellite orbit and clock error	IGS precise orbit and clock product
Tropospheric delay error	Saastamoinen model
Code noise and multipath	leveled carrier phase (post processing)

위 검증 기법을 적용하는 과정에서 leveled carrier phase 측정치는 다음과 같은 과정을 거쳐 생성된다.

먼저 반송파 측정치는 의사거리와 전리층 부호가 다르므로 이를 의사거리와 동일하게 맞춰줘야 하며, 다음 식과 같이 L1, L2 반송파 측정치를 조합하여 전리층 부호가 통일된 반송파 측정치를 생성한다.

$$\begin{aligned}
 \phi_1' &= \phi_1 + \alpha_1(\phi_1 - \phi_2) \\
 &= d - \{b + (\alpha_1 + 1)b_{\phi_1}^{Tx} - \alpha_1 b_{\phi_2}^{Tx}\} + \{B + (\alpha_1 + 1)b_{\phi_1}^{Rx} - \alpha_1 b_{\phi_2}^{Rx}\} \\
 &\quad + I + T + \{(\alpha_1 + 1)N_1\lambda_1 - N_2\lambda_2\} + \varepsilon_{\phi_1}.
 \end{aligned} \quad (4-16)$$

$$\alpha_1 = \frac{2}{\gamma - 1} \approx 2 \cdot 1.5457 \approx 3.1 \quad (4-17)$$

ϕ_1' : ionosphere corrected carrier phase measurement

다음으로 hardware bias와 미지정수로 인한 바이어스 항들을 추정하여 제거해줘야 하는데, 이러한 바이어스 항은 의사거리 측정치와 차이로부터

계산한다. 연속적인 데이터에 대하여 의사거리 측정치와 위와 같이 계산된 반송파 측정치의 차이를 계산하고, 모든 연속적인 시간에 대하여 평균을 낸다.

$$\begin{aligned}
B_1 &= \phi_1' - \rho_1 \\
&= -\{(\alpha_1 + 1)b_{\phi_1}^{Tx} - \alpha_1 b_{\phi_2}^{Tx} - b_{\rho_1}^{Tx}\} + \{(\alpha_1 + 1)b_{\phi_1}^{Rx} - \alpha_1 b_{\phi_2}^{Rx} - b_{\rho_1}^{Rx}\} \\
&\quad + \{(\alpha_1 + 1)N_1\lambda_1 - \alpha_1 N_2\lambda_2\} + \{\varepsilon_{\phi_1}' - \varepsilon_{\rho_1}\}
\end{aligned} \tag{4-18}$$

$$\begin{aligned}
mean\{B_1\} &= -\{(\alpha_1 + 1)b_{\phi_1}^{Tx} - \alpha_1 b_{\phi_2}^{Tx} - b_{\rho_1}^{Tx}\} \\
&\quad + \{(\alpha_1 + 1)b_{\phi_1}^{Rx} - \alpha_1 b_{\phi_2}^{Rx} - b_{\rho_1}^{Rx}\} \\
&\quad + \{(\alpha_1 + 1)N_1\lambda_1 - \alpha_1 N_2\lambda_2\} \\
&\quad + mean\{\varepsilon_{\phi_1}' - \varepsilon_{\rho_1}\}
\end{aligned} \tag{4-19}$$

B_1 : difference between pseudorange and ionosphere corrected carrier phase measurement

전리층 부호를 맞춘 반송파 측정치에 계산된 바이어스 값을 보상하면 구하고자 하는 정밀한 leveled carrier phase 측정치를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
\phi_{1,leveled} &= \phi_1' - mean\{B_1\} \\
&= d - (b + b_{\rho_1}^{Tx}) + I + T + (B + b_{\rho_1}^{Rx}) + [\varepsilon_{\phi_1}' - mean\{\varepsilon_{\phi_1}'\}] + mean\{\varepsilon_{\rho_1}\} \\
&\approx d - (b + b_{\rho_1}^{Tx}) + I + T + (B + b_{\rho_1}^{Rx}) + mean\{\varepsilon_{\rho_1}\}
\end{aligned} \tag{4-20}$$

생성된 leveled carrier phase는 의사거리 측정치와 측정치 오차부분을

제외한 나머지 부분들은 동일하다. 의사거리의 잡음, 다중경로 오차 값이 평균을 취한 값으로 변경되므로 측정치 오차가 훨씬 작은 의사거리 값이 된다. 이러한 leveled carrier phase 측정치 생성을 위해서는 carrier phase의 cycle slip 검출을 정확히 해야 하므로 1초 간격의 데이터가 필요하다. 국외 기준국의 경우 1초 간격의 데이터를 확보하기에 어려움이 있으므로 본 논문에서는 국내 기준국들을 활용하여 검증을 수행하였다. IFB 추정 시 사용되는 5개의 기준국에 수원 기준국을 추가하여 검증을 수행하였다.

3) 테스트 결과

다음은 앞서 설명한 테스트 환경, 검증 방법에 따라 테스트한 결과이다. 먼저 각 case 별로 나타나는 의사거리 잔차의 평균 값을 나타낸 그래프는 Figure 4-23, Figure 4-24, Figure 4-25와 같다. 그리고 각 case 별로 나타나는 위치 오차는 Figure 4-26, Figure 4-27, Figure 4-28와 같다. 의사거리 잔차의 경우 2014년 9월 1일 기준으로 healthy 하지 않았던 3번, 9번 위성과 정밀 궤도력 데이터에 문제가 있던 4번 위성을 제외하고 분석되었다.

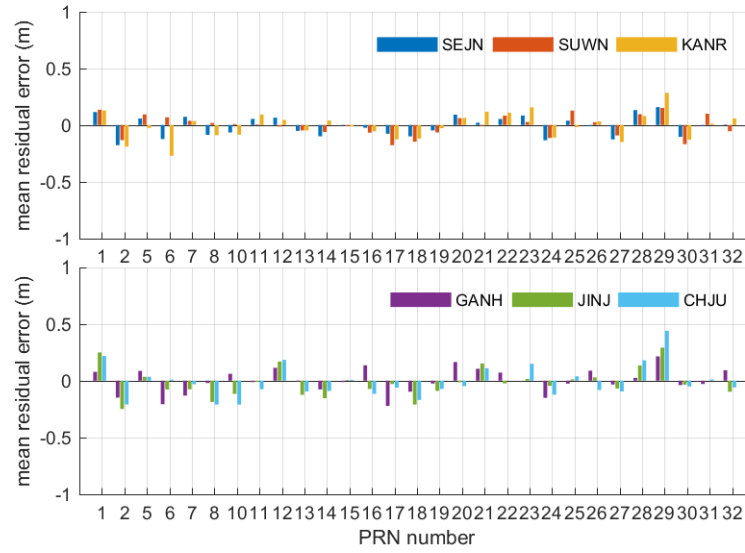


Figure 4-23 average pseudorange residual (case 1)

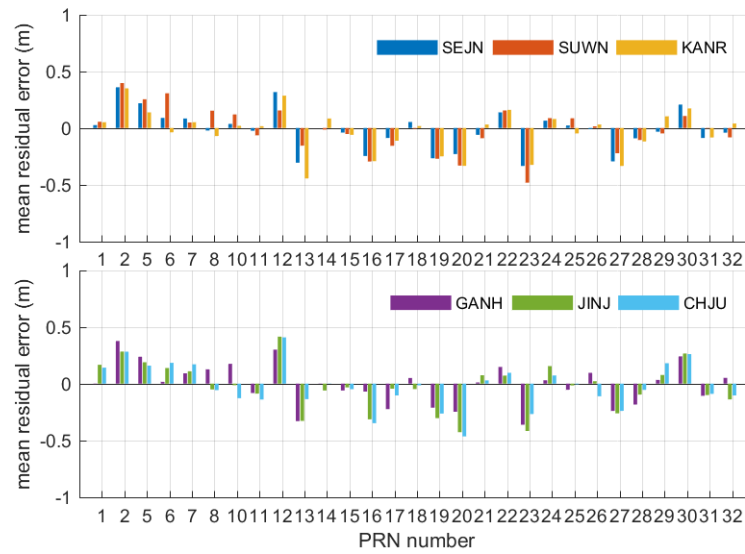


Figure 4-24 average pseudorange residual (case 2)

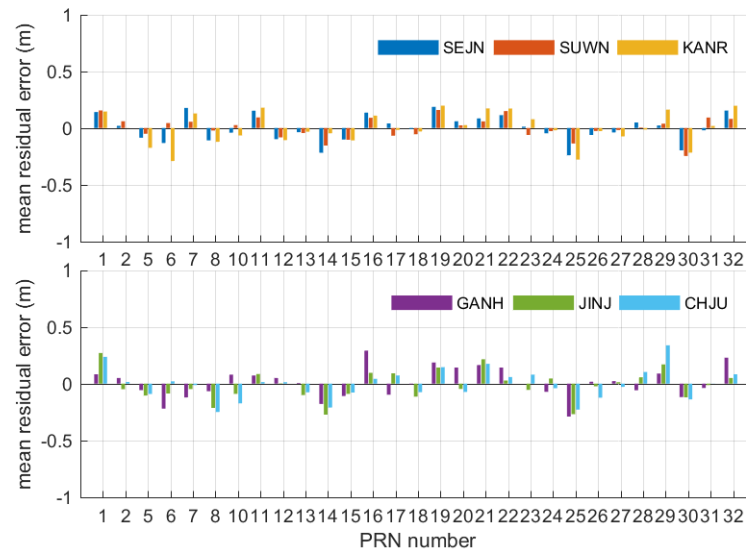


Figure 4-25 average pseudorange residual (case 3)

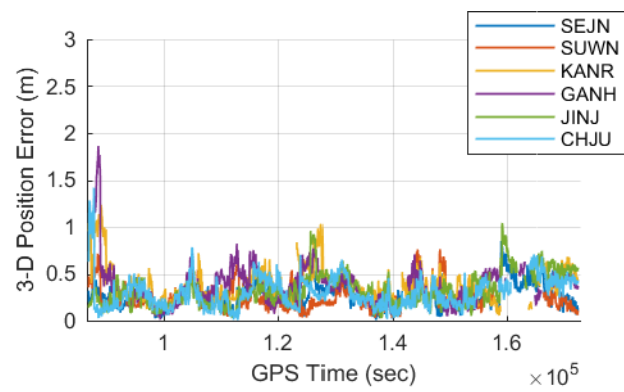


Figure 4-26 position error (case 1)

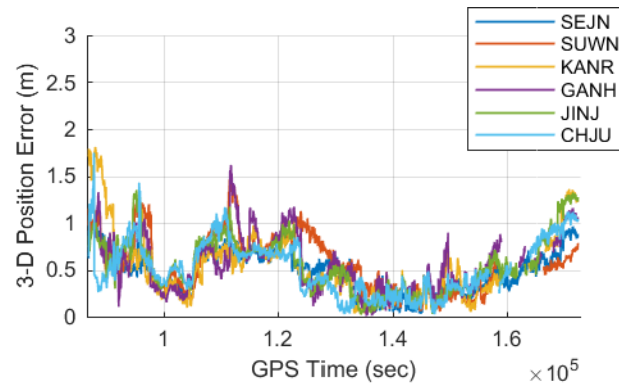


Figure 4-27 position error (case 2)

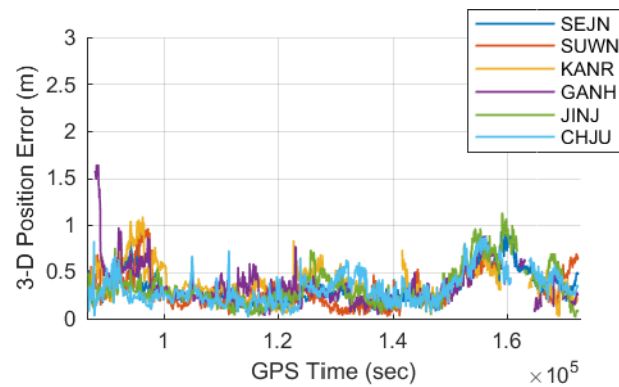


Figure 4-28 position error (case 3)

먼저 위 그림들에서 case 별로 각 위성에 나타나는 잔차가 기준국에 따라 유사한 값을 보이는 것을 볼 수 있다. 이는 다른 오차 요인들이 효과적으로 제거되고 남은 오차는 바이어스 오차의 비율이 높음을 의미한다. 의사 거리에서 나타나는 잔차가 비슷하므로 case 별로 나타나는 위치오차도 기준국에 따라 유사한 값을 보이고 있다. 위 결과를 정리하면 Table 4-3 과 같다.

Table 4-3 position error and pseudorange residual statistics

	3D Position Error (m)			3D Pseudorange residual (m)		
	Case 1	Case 2	Case 3	Case 1	Case 2	Case 3
SEJN	0.30	0.53	0.40	0.13	0.24	0.19
SUWN	0.27	0.65	0.43	0.13	0.25	0.19
KANR	0.43	0.64	0.48	0.17	0.26	0.20
GANH	0.29	0.64	0.42	0.14	0.25	0.19
JINJ	0.36	0.63	0.50	0.17	0.28	0.21
CHJU	0.34	0.59	0.47	0.17	0.26	0.19

기존의 방법대로 1일의 constant 가정만으로 추정한 case 1, case 2 결과에서는 네트워크 크기에 따른 추정 정확도를 확인해볼 수 있다. 전 세계 네트워크를 활용한 case 1이 한국의 기준국 네트워크만 활용한 case 2 보다 더 작은 오차수준을 보이고 있다. 이는 곧 전 세계 네트워크를 활용하여 추정된 IFB 값이 한국의 기준국만을 활용하여 추정한 값보다 정확하다는 것을 의미한다. 제안된 방법을 사용하여 장기간의 데이터를 누적한 case3의 경우 case 2 대비 오차가 감소함을 확인할 수 있다. 이는 제안된 방법이 좁은 기준국에서 발생하는 IFB 추정 정확도 감소 문제를 완화시킴을 의미한다.

전 세계 네트워크를 사용한 case 1 대비 한국의 기준국만을 사용하여 IFB를 추정하는 case 2는 검증 결과에서 위치 오차, 의사거리 잔차가 각각 84%, 67% 큰 결과를 보였다. 연속 7일 동안의 IFB가 상수라는 가정으로 추정된 case 3에서는 case 1 대비 위치 오차, 의사거리 잔차가 각각 36%, 26% 큰 결과를 보였다. 그리고 7달 동안 IFB가 상수라는 가정으로 추정된 case 4에서는 case 1 대비 위치 오차, 의사거리 잔차가 각각 9%, 13% 큰

결과를 보여, 우리나라 기준국 만을 활용했음에도 불구하고 전세계 네트워크를 사용한 것에 비해 크게 오차가 증가하지 않는 것을 볼 수 있다.

앞서 언급했던 성능 저하 요인 중 측정치가 수집되는 전리층 환경과 추정 정확도 간의 연관성을 알아보기 위하여 전체 의사거리 잔차 데이터를 local time에 따라 나타내고 분석을 하였다. Local time을 일정 간격으로 나누고, 각 구간에서 나타나는 의사거리 잔차의 RMS 값을 계산하여 그래프로 나타내었다. 다른 잔여 오차의 영향을 최소화 하기 위하여 양각 15도 이상의 데이터, 2시간 이상 연속적인 데이터가 존재하는 구간들의 오차만 RMS 계산에 포함을 시켰다. Figure 4-29은 local time에 대하여 계산된 의사거리 잔차를 나타낸 그림이다.

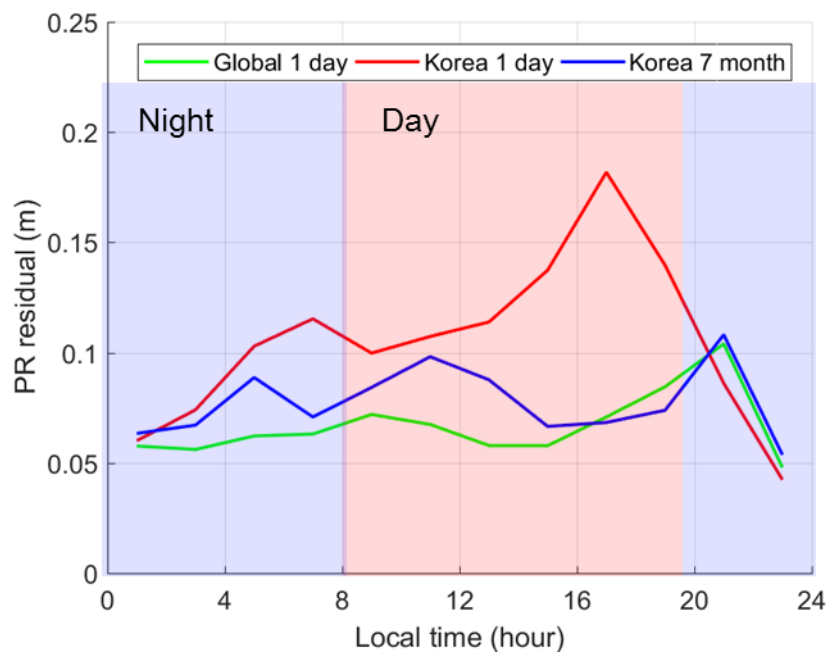


Figure 4-29 pseudorange residual versus local time (2014.09.01.)

한국 기준국의 1일 데이터를 활용하여 추정된 IFB를 적용할 때 나타나는 의사거리 잔차를 빨간색으로 나타냈으며, 전세계 기준국의 1일 데이터를 활용하여 추정된 IFB를 적용할 때 나타나는 잔차를 초록색으로 도시하였다. 제안된 방법을 활용하여 7달의 데이터를 누적하여 추정된 IFB를 적용한 결과는 파란색으로 도시하였다. 낮 시간대와 밤시간대의 잔차 차이를 구분하기 위하여 낮 시간대에 해당하는 영역에 대해서는 붉은색, 밤 시간대에 해당하는 영역에 대해서는 파란색으로 그래프의 배경을 표시하였다. 앞서 통계에서 볼 수 있듯이 전체적인 오차는 case 2, case 3, case1 순으로 나타났다. 우리나라 기준국 1일 데이터만을 활용하는 case 1의 경우, 낮 시간대에서 의사거리 잔차가 크게 증가하는 모습을 볼 수 있다. 이는 낮 시간대에 가시성이 확보되는 위성에 대해서 IFB 추정 오차가 크기 때문이다. 반면에 제안된 방법을 쓴 경우에는 낮 시간대에 오차가 크게 증가하는 현상이 감소함을 확인할 수 있다.

추가적인 검증을 위하여 9월 1일 데이터 이외에도 추정에 사용된 데이터들을 활용하여 3월 1일부터 8월 1일까지 한달 간격으로 동일한 테스트를 수행하였고, Figure 4-30은 결과를 앞서 제시한 그래프와 같이 나타낸 것이다.

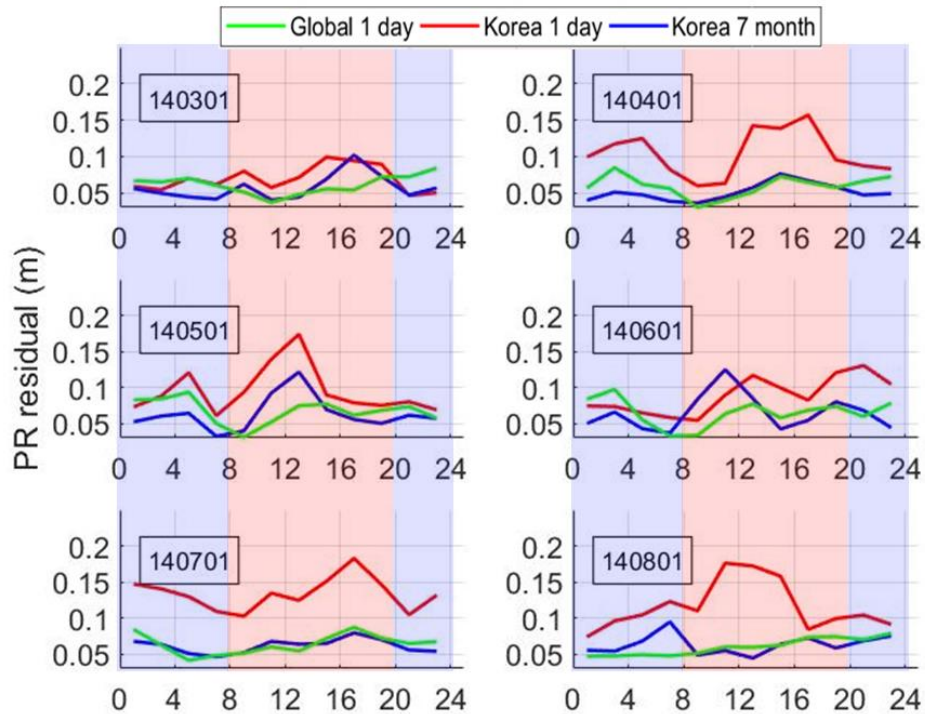


Figure 4-30 pseudorange residual versus local time (2014.03.01~2014.08.01.)

추가 검증 결과에서도 앞서 봤던 결과와 유사한 결과가 나타남을 확인할 수 있다. 우선 전체적인 잔차 수준은 전세계 네트워크를 활용하여 추정된 IFB를 적용하는 경우가 가장 작았다. 하루 데이터만 활용한 IFB를 추정한 결과에서는 대체적으로 낮 시간대에 오차가 크게 증가하는 부분들이 나타나는 문제가 존재하였으며, 7달 데이터를 누적하여 추정한 결과에서는 이러한 현상이 개선되었다.

5장. 이중차분 반송파 측정치를 활용한 전리층 모델링 알고리즘

1. 전리층 모델링 측정치

1) 의사거리 기반 전리층 지연 측정치

의사거리 기반으로 얻어지는 전리층 지연 측정치를 IFB는 완전히 제거되었다고 가정하고 식을 나타내면 다음과 같다.

$$I_{\rho} = I + \varepsilon_{I_{\rho}} \quad (5-1)$$

I_{ρ} : pseudorange based ionospheric delay measurement

I : true ionospheric delay

$\varepsilon_{I_{\rho}}$: the error of pseudorange based ionospheric delay measurement

의사거리 기반의 전리층 지연 측정치는 전리층 지연에 대하여 절대 값 정보를 지닌다. 즉, 전리층 지연의 크기가 어느 정도 되는지 직접적인 정보를 준다. 기존의 SBAS 전리층 모델링에서는 의사거리 측정치로부터 얻어지는

전리층의 크기 정보를 바탕으로 격자 맵을 추정하여 사용자에게 제공해왔다 [15, 21, 55-57].

의사거리 측정치는 전리층 지연 크기의 절대 값을 주는 장점을 가진 반면에 측정치의 오차수준이 크다는 단점을 지니고 있다. 앞서 GPS 측정치에서 언급하였듯이 의사거리 측정치는 수 m 수준의 잡음, 다중경로 오차를 가지고 있다. 이를 그대로 활용하여 모델링을 하는 경우에는 큰 오차 수준을 갖게 된다. Figure 5-1은 L1, L2 의사거리의 원시데이터를 활용하여 전리층 지연 측정치를 계산할 때 발생하는 오차 예시이다.

후처리 leveled carrier 측정치로 만들어지는 전리층 지연 값을 기준으로 원시 데이터의 오차를 계산하고 나타내었다. 한 기준국의 1일 동안 모든 위성에 대하여 오차를 겹쳐 그린 것이며 위성이 뜨고 지는 데이터 시작 양끝단에서 오차가 증가하는 경향이 있다. 즉, 낮은 양각의 위성 측정치의 오차가 큰 모습을 보인다. 이 경우 전리층 지연 측정치의 오차는 최대 10 m 이상까지도 발생하는 것을 확인할 수 있다.

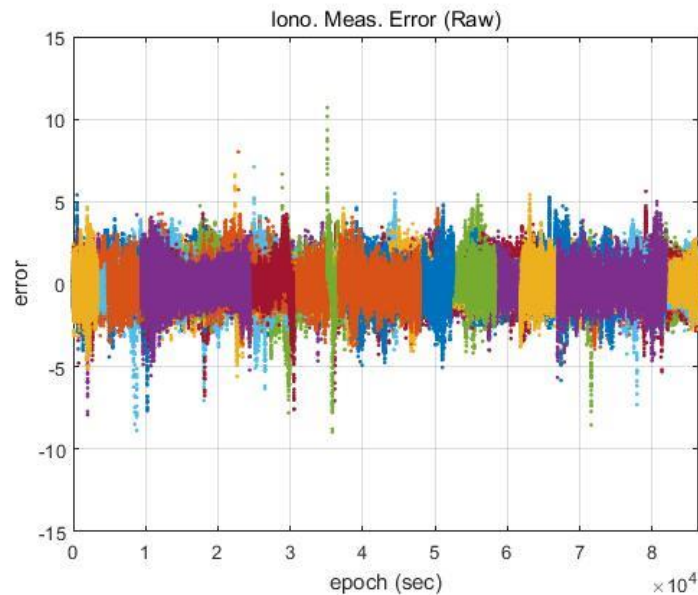


Figure 5-1 Ionospheric delay measurement error (pseudorange, raw data)

이러한 의사거리 측정치의 큰 오차 수준을 완화시키기 위한 방법으로 많이 사용 되는 것이 앞서 전처리 과정에서 소개한 Hatch filter 이다. 정밀한 반송파의 변화량을 도입하여 필터링함으로써 서서히 오차를 감소시키게 된다. Figure 5-2는 Hatch filter를 적용 했을 때 나타나는 측정치 오차를 나타낸 그래프이다. 전처리 알고리즘에서 소개된 weighted hatch filter의 결과를 leveled carrier 측정치와 비교한 결과이다.

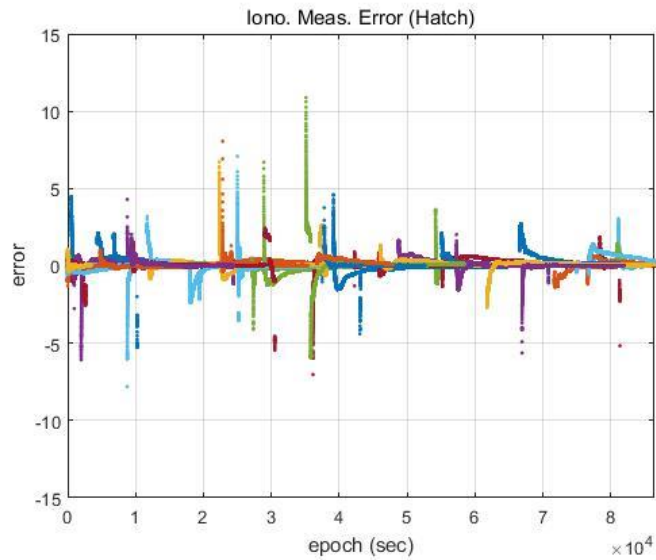


Figure 5-2 Ionospheric delay measurement error (pseudorange, hatch filter)

필터링이 시작되는 초기에는 의사거리 측정치에 존재하는 오차가 그대로 반영되므로 큰 오차 수준을 보이지만 점차 필터가 수렴해 감에 따라서 오차가 감소하는 모습을 보인다. 이를 smoothing 시간에 따라서 다시 나타내면과 같다.

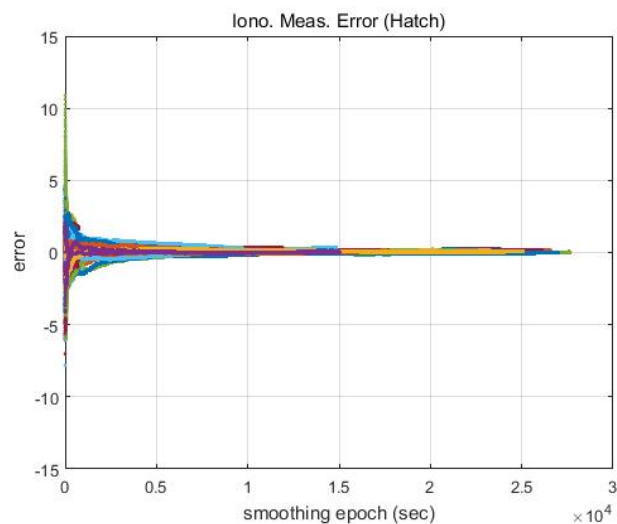


Figure 5-3 measurement error versus smoothing time (pseudorange, Hatch filter)

위 그림을 확대하여 초기 수렴 구간을 나타내면 Figure 5-4와 같다.

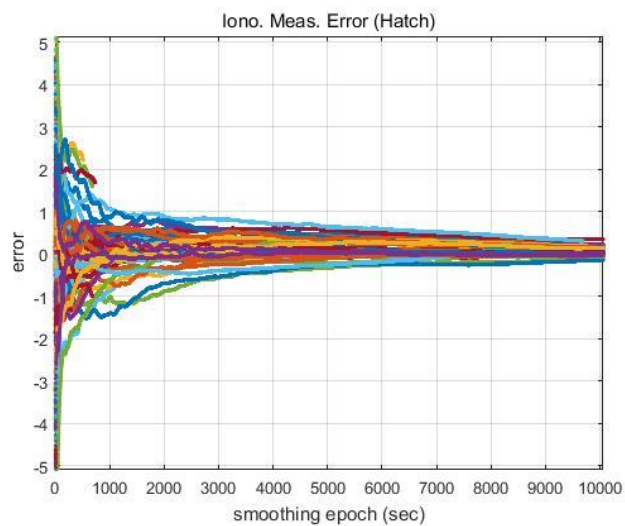


Figure 5-4 measurement error versus smoothing time (pseudorange, Hatch filter, modified axis)

초기 10 m까지 발생하는 오차가 필터링이 진행됨에 따라 급격히 감소하며 일정 시간이 지난 이후에는 감소하는 속도가 감소하여 천천히 수렴하게 된다. 완전히 수렴하기 까지는 오랜 시간이 필요하며 필터링 시작 후 대략 1시간 이내에는 1m 이하의 오차를 보이고 있고, 2시간 이후에는 50 cm 이하 수준의 오차를 보인다.

2) 반송파 기반 전리층 지연 측정치

반송파 기반으로 계산되는 전리층 지연 측정치는 다음 식과 같이 표현 될 수 있다.

$$\begin{aligned}
 I_{\phi} &= \frac{\phi_1 - \phi_2}{\gamma - 1} \\
 &= I + \frac{1}{\gamma - 1} \left\{ -\left(b_{\phi_1}^{Tx} - b_{\phi_2}^{Tx}\right) + \left(b_{\phi_1}^{Rx} - b_{\phi_2}^{Rx}\right) + \left(N_1 \lambda_1 - N_2 \lambda_2\right) + \left(\varepsilon_{\phi_1} - \varepsilon_{\phi_2}\right) \right\} \\
 &= I + IFB_{\phi_1/\phi_2}^{Tx} - IFB_{\phi_1/\phi_2}^{Rx} + \frac{1}{\gamma - 1} \left\{ \left(N_1 \lambda_1 - N_2 \lambda_2\right) + \left(\varepsilon_{\phi_1} - \varepsilon_{\phi_2}\right) \right\}
 \end{aligned} \tag{5-1}$$

I_{ϕ} : carrier-based ionospheric delay measurement

IFB_{ϕ_1/ϕ_2}^{Tx} : satellite IFB in carrier phase measurement

IFB_{ϕ_1/ϕ_2}^{Rx} : receiver IFB in carrier phase measurement

1개의 수신기, 1개의 위성에서 얻어지는 위 반송파 측정치에는 미지정수가 포함되어 있으며 이로 인해 절대량을 알 수가 없다. RTK에서는 반송파 측정치를 단순히 사용하는 것이 아니라 수신기, 위성 간 차분을 통하여 사용을 하게 된다. 위성, 수신기에 대하여 2중차분된 반송파 기반 전리층 지

연 측정치를 다시 식으로 쓰면 다음과 같다.

$$\nabla\Delta I_{\phi,N} = \nabla\Delta I + \frac{1}{\gamma-1} \left[\nabla\Delta(N_1\lambda_1 - N_2\lambda_2) + \nabla\Delta(\varepsilon_{\phi_1} - \varepsilon_{\phi_2}) \right] \quad (5-2)$$

$\nabla\Delta I_{\phi,N}$: double-difference ionospheric delay measurement without removing integer ambiguity

위성, 수신기의 IFB는 각각 기준국, 위성간 차분 시 소거가 되고, 남은 항은 전리층 지연, 미지정수의 이중차분 값과 측정치 오차가 된다. RTK에서 미지정수를 추정하여 결정하게 되는 경우에는 위 식에 포함되어 있는 미지정수에 대한 항을 소거할 수 있고, 그 때의 이중차분 반송파 기반 전리층 지연 측정치를 나타내면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \nabla\Delta I_{\phi} &= \nabla\Delta I + \frac{1}{\gamma-1} \left[\nabla\Delta(\varepsilon_{\phi_1} - \varepsilon_{\phi_2}) \right] \\ &= \nabla\Delta I + \varepsilon_{\nabla\Delta I} \end{aligned} \quad (5-3)$$

$\nabla\Delta I_{\phi}$: double-difference ionospheric delay measurement with removing integer ambiguity

$\varepsilon_{\nabla\Delta I}$: double-difference ionospheric delay measurement error

위 식과 같이 표현된 반송파 기반 측정치가 가지는 이점은 측정치의 잡음으로 인한 오차가 매우 작다는 점이다. 이중 차분된 전리층 지연 오차에는 실제 전리층 지연오차가 이중 차분된 값과 측정치 오차의 이중 차분된 값이 포함되어 있다. 실제 전리층 지연 오차의 이중 차분된 값은 작은 수준을 보이며 변화량도 작다. 이를 고려하면 시간에 대해 차분 했을 때, 실제 전

리층 지연량에 대한 항은 거의 사라지고 잡음에 의한 항이 주로 남게 된다. 따라서 시간에 대한 차분 값으로부터 이중 차분 전리층 지연 측정치의 잡음 수준을 계산해 볼 수 있다. Figure 5-5는 실제 수집된 이중 차분 전리층 지연 오차에 대하여 잡음 수준을 계산한 그래프이다. 기준 위성은 높은 양각의 위성이 선택되는데, 이중차분을 수행하는 기준위성이 아닌 위성의 양각을 x축으로 하여 잡음을 나타내었다.

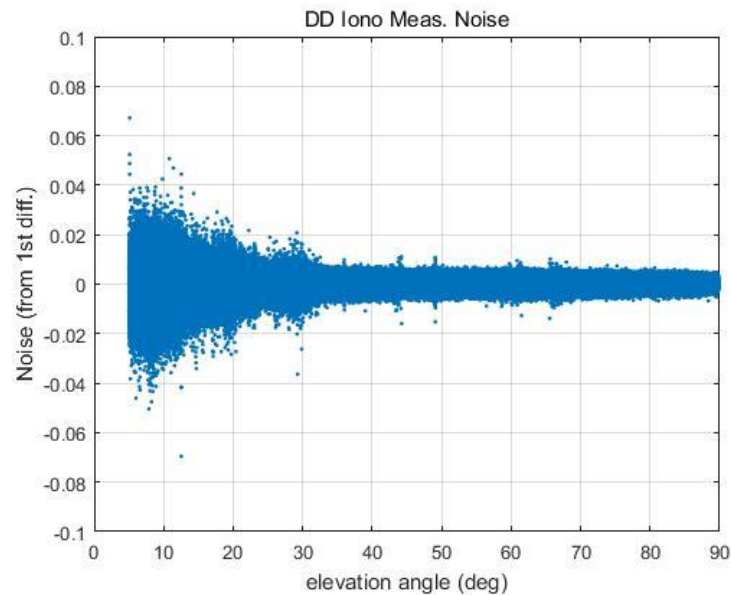


Figure 5-5 noise of double-difference ionospheric delay measurement

위 그림에서 의사거리 측정치가 10m에 달하는 측정치 오차를 보였던 것에 비하여 훨씬 작은 측정치 오차 수준을 보이고 있음을 확인할 수 있다. 시간 차분 방식으로 계산된 오차에서는 다중경로 오차까지 포함하여 함께 볼 수 없는 문제가 있으므로 실제 측정치의 오차는 제시된 그림보다 크게

발생할 것이다. 이러한 문제를 고려하더라도 의사거리에 비하여 대략 1/100 수준의 오차를 보이고 있으므로 훨씬 정밀한 측정치라고 볼 수 있다.

반송파 기반 측정치의 단점으로는 전리층 지연량의 절대적인 값이 아닌 위성, 수신기에 대하여 이중 차분된 상대적인 값을 준다는 점이다. 이로 인해 의사거리처럼 전리층 지연 모델링에 곧바로 적용하기 어려운 점이 존재한다.

RTK 관련 연구에서는 의사거리가 아닌 반송파 측정치를 사용하여 전리층을 모델링 하는 방법이 제안된 바 있다. Schaer는 이중차분 측정치를 기반으로 spherical harmonics 모델링을 수행하였다 [22]. 이 연구에서는 이중 차분 전리층 지연 측정치를 spherical harmonics 모델 식으로 구성하여 spherical harmonics 계수를 추정하였다. 실시간을 고려한 처리가 아닌 후 처리 모델링만 고려되고, 일정 기간 동안 누적된 이중차분 전리층 지연 측정치들을 바탕으로 계수 값을 추정하였다. 또한 모델링 결과를 이중차분 측정치에 적용한 결과만을 제시하였고, SBAS나 다른 절대거리 기반의 항법에 적용 가능한지 검증이 수행되지 않았다.

Liao는 이중 차분 측정치를 기반으로 grid 모델을 활용하여 전리층을 모델링 하였다 [23]. 이 연구에서도 마찬가지로 이중차분 측정치에 모델링 결과를 적용함으로써 RTK 연구의 활용에 대해서만 분석을 수행했으며 절대거리 기반 항법에 적용 가능성은 고려되지 않았다.

2. 의사거리와 이중차분 반송파 측정치를 활용한 전리층 모델링

1) 의사거리와 반송파 측정치를 활용한 모델링 원리

기존의 SBAS 전리층 모델링과 같이 의사거리만 이용하여 모델링을 수행하는 경우, 높은 측정치 오차 수준으로 인한 모델링 성능 저하가 발생할 수 있다. 특히 측정치 품질이 좋지 않은 저앙각에서 모델링 성능이 크게 저하된다. 반면에 반송파 측정치만을 이용하는 경우, 반송파 측정치는 상대적인 값의 정보만을 담고 있으므로 충분한 기간 동안 측정치가 누적되지 않으면 큰 바이어스 오차를 가진 전리층 맵을 추정하게 된다. Figure 5-6이를 간단하게 표현하기 위하여 제안된 개념도이다. 기준국 바로 위에 높은 앙각의 위성을 표현했으며 오른쪽 위에 낮은 앙각의 위성을 표현하였다.

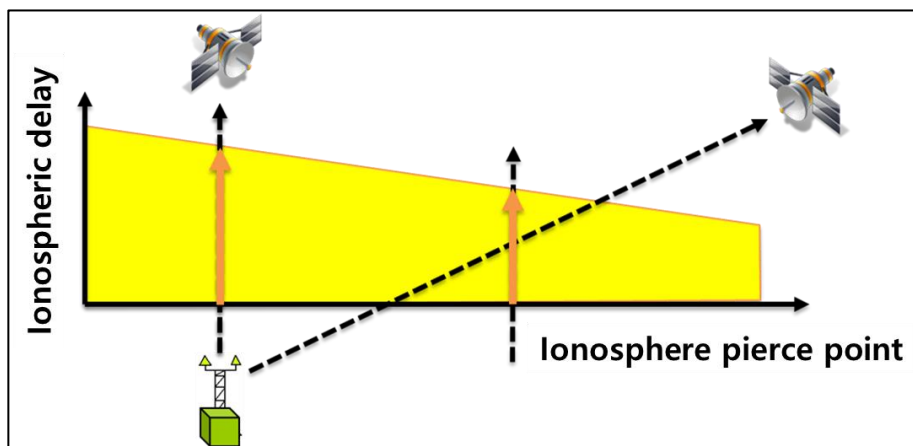


Figure 5-6 conceptual diagram for ionosphere modeling environment

각각의 위성으로부터 얻어지는 수직 전리층 지연 측정치는 주황색으로 표시된 화살표와 같다. Figure 5-7은 이때 의사거리로부터 얻어지는 전리층 지연 측정치에 대하여 나타낸 그림이다.

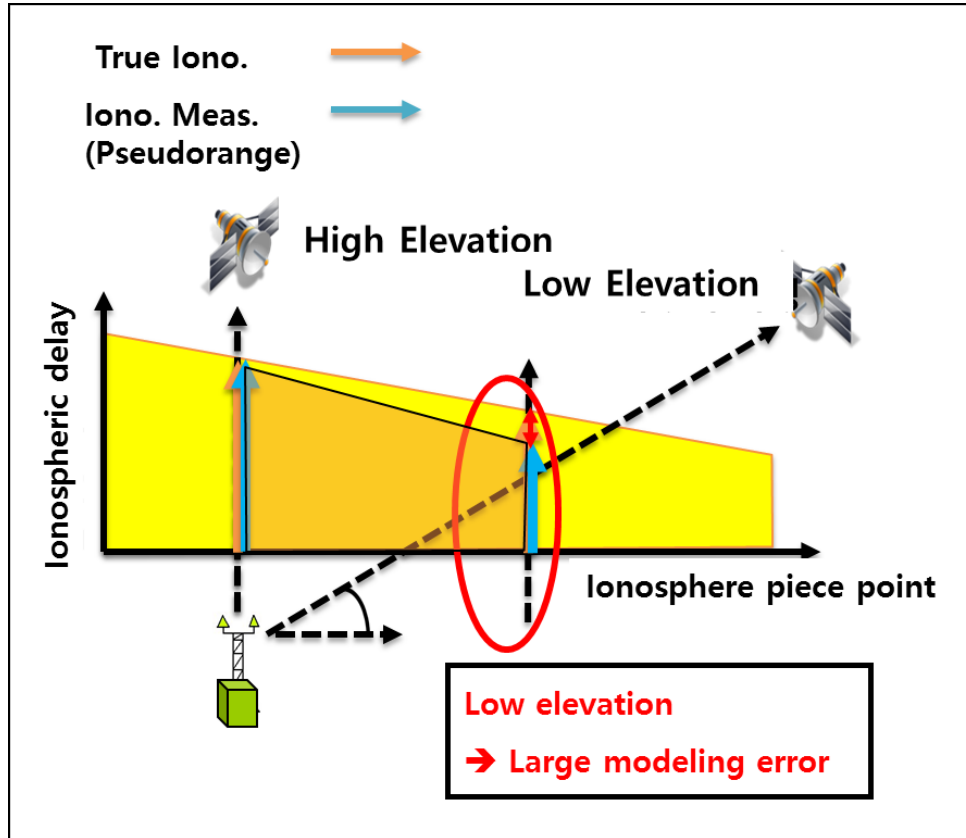


Figure 5-7 conceptual diagram for ionosphere modeling using pseudorange measurement

의사거리의 경우 해당 위치의 전리층 지연에 대하여 차분되지 않은 정보를 제공하지만 낮은 양각 측정치의 경우 오차가 크므로 실제와 차이가 큰 오차가 존재한다. 이로 인해 저양각 측정치가 얻어지는 외곽 영역에서는 모델링 성능이 저하되는 문제가 발생한다.

Figure 5-8는 반송파로부터 전리층 지연 측정치에 대하여 특성을 나타낸 그림이다. 반송파 측정치의 경우 전리층 지연 값에 대하여 절대적인 값의

정보를 주지 못하지만 측정치 IPP 사이의 상대적인 값을 제공한다. 그러나 상대적인 값 만으로는 값 자체의 크기를 알기 어려우며 반송파 만을 이용하여 추정을 하는 경우 큰 바이어스 오차가 발생할 수 있다.

본 연구에서는 두 가지의 측정치 정보를 결합하여 모델링 성능을 개선하는 연구를 수행하였다. SBAS 전리층 모델링에서 의사거리 측정치만을 이용할 때 발생하는 낮은 양각의 모델링 성능 저하 문제를 정밀한 상대적인 값의 정보를 가진 반송파 측정치를 활용하여 개선하였다. Figure 5-8는 의사거리, 반송파 측정치를 활용한 모델링 성능 개선 개념도를 나타낸 것이다.

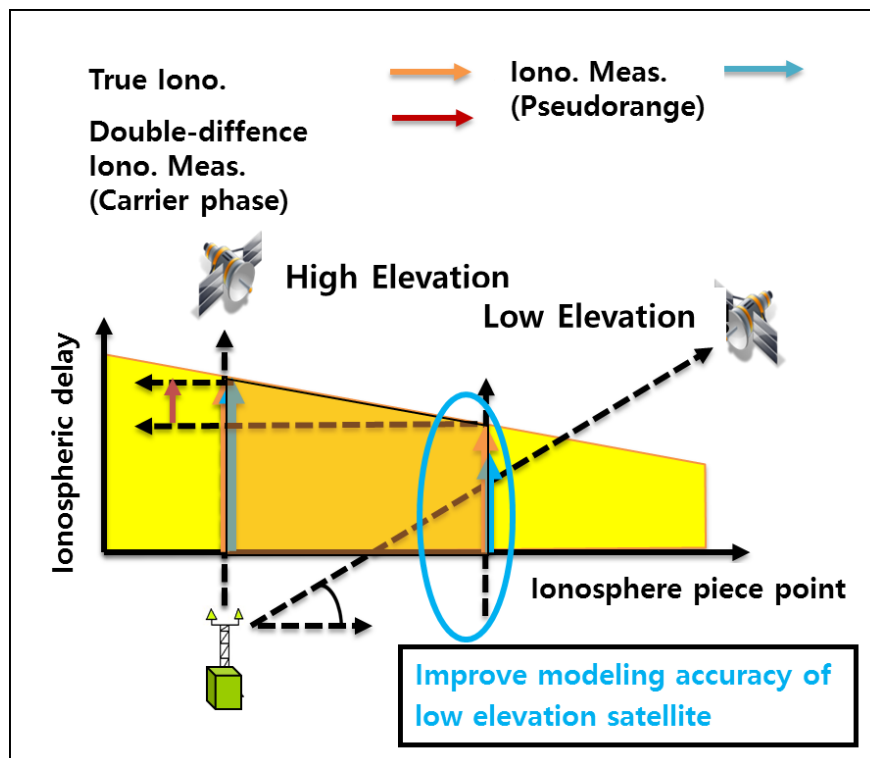


Figure 5-8 conceptual diagram for ionosphere modeling using pseudorange and double-difference carrier phase measurement

의사거리 측정치의 경우에도 높은 양각의 측정치는 충분히 필터링이 진행되어 낮은 오차 수준을 보인다. 상대적으로 낮은 오차, 높은 신뢰수준을 갖는 높은 양각 의사거리 측정치를 기준으로 이중 차분 반송파 측정치의 정밀한 상대값을 적용하면 낮은 양각에서도 모델링 성능이 크게 떨어지지 않는 결과를 얻을 수 있다.

개념도는 단일 차분의 개념으로 설명이 되었으나 이중 차분을 하더라도 유사한 개념이 확장된다. 하나의 위성에 대한 수신기간 차분은 각 기준국 수신기의 해당 위성에 대한 IPP간의 상대적인 차이 값 정보를 준다. 그리고 기준 위성에 대한 수신기간 차분은 각 기준국 수신기의 기준 위성에 대한 IPP간의 상대적인 차이 값 정보를 준다. 이중 차분 측정치는 특정 위성에 대한 수신기 차분과 기준위성에 대한 수신기 차분 값을 뺀 측정치이므로 앞서 설명한 각 위성의 측정치에 대한 차이 값을 다시 한번 뺀 차이 값을 제공해주게 된다.

2) 전리층 모델링 알고리즘

① 전체 데이터 처리 흐름도

다음은 본 연구에서 제안한 전리층 모델링 알고리즘의 전체 데이터 흐름도를 나타낸 것이다. 먼저 여러 기준국으로부터 의사거리, 반송파 측정치가 수집된다. 기존의 SBAS 전리층 모델링에서는 hatch filter를 활용하여 smoothing된 의사거리에 IFB 값을 보상하여 전리층 지연 측정치를 얻고, 전리층 모델링을 수행하였다. 본 연구에서는 거기에 이중차분 전리층 지연 측정치를 함께 모델링에 활용함으로써 성능을 개선하였다. Figure 5-9은 전체 데이터 처리 흐름도를 나타낸 것이다.

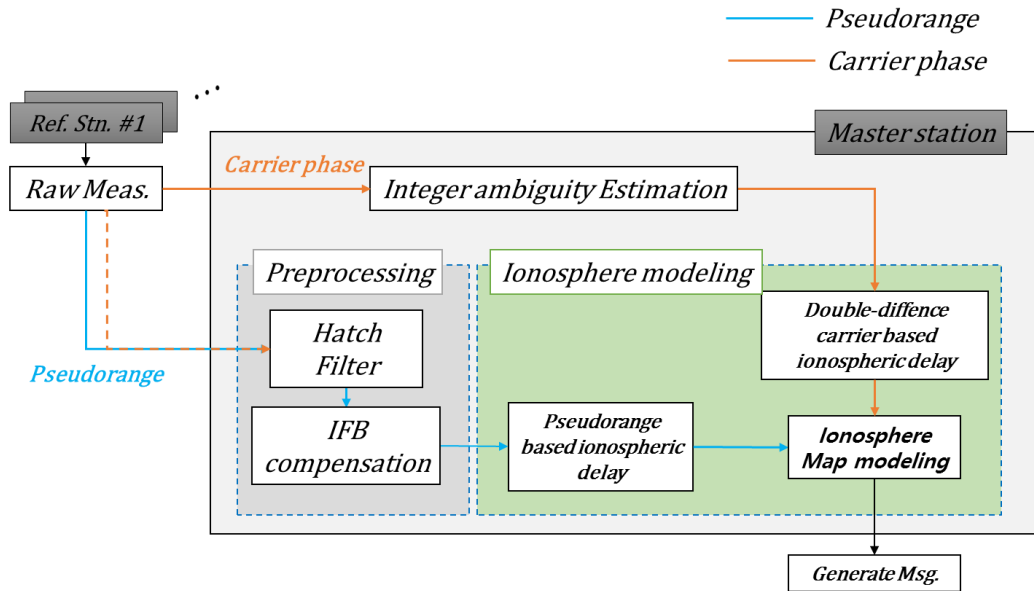


Figure 5-9 Ionosphere modeling process

이중차분 반송파 측정치의 미지정수를 추정하여 바이어스가 제거된 이중차분 전리층 지연 측정치를 추가하는 것이 본 연구의 핵심이다.

② 관측식 구성

본 연구에서는 여러 가지 전리층 모델링 기법 중 spherical harmonic가 사용되었다. 기존의 SBAS 알고리즘인 IDW, kriging의 경우에는 추정하고자 하는 격자점을 기준으로 일정 반경 안에 들어오는 측정치들을 보간하는 방법으로 전리층 맵을 추정하였다. 이중 차분 측정치를 활용하기 위해서는 2개의 수신기에서 수집된 2개의 위성의 측정치가 추정식에 포함되어야

한다. 그러나 IPP의 분포를 보면 여러 위성의 IPP가 제한 반경 안에 모두 들어오지 못하는 경우가 많이 발생하게 된다. Figure 5-10은 여러 기준국에서 관측되는 각 위성의 IPP 위치를 나타낸 그림이다.

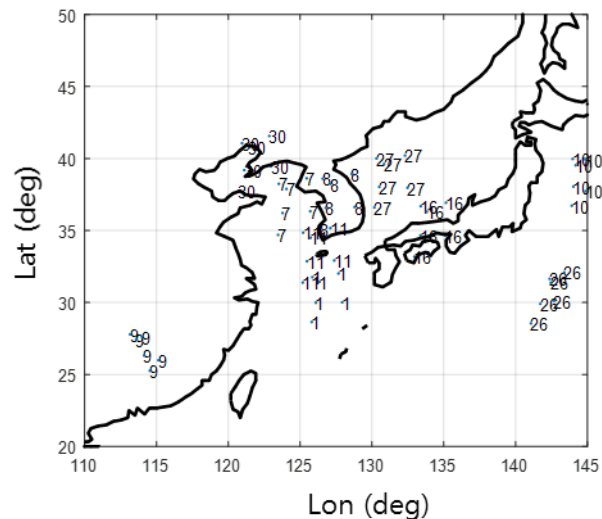


Figure 5-10 IPP distribution example

위 그림에서 위도 25, 경도 115도의 격자점에서는 반경 안에 들어오는 위성이 9번 위성밖에 없고, 이 경우에는 위성간 차분을 적용할 수 없다. 따라서 기존의 IDW, kriging과 같이 보간 방식이 아니라 맵 전체를 한번에 추정하는 방식의 모델링 기법이 요구된다. Spherical harmonics의 경우 수집된 측정치들을 한번에 모아 전체 맵을 추정하는 방식이므로 이중 차분 측정치를 활용하기가 용이하다.

다음은 먼저 의사거리 기반 경사 전리층 지연 측정치를 spherical harmonics 식으로 표현한 식이다.

$$\begin{aligned}
I &= I_v \cdot Q \\
&= \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^n P_{nm}(\sin(\phi)) \cdot \{C_{nm} \cdot \cos(m\lambda) + S_{nm} \cdot \sin(m\lambda)\} \cdot Q
\end{aligned} \tag{5-4}$$

I : pseudorange based ionospheric delay measurement

I_v : vertical ionospheric delay at IPP

본 연구에서는 degree 값을 3으로 두고 전리층 모델링을 수행하였다. 전 세계를 대상으로 모델링을 할 때는 10 이상의 값으로도 설정하는 경우도 있으나 우리나라와 같이 작은 영역을 다룰 때에는 그보다 훨씬 작은 값으로도 충분한 해상도를 확보할 수 있다. 물론 우리나라에서도 높은 degree를 사용하면 더 세밀한 모델링을 할 수 있으나 메시지량이 기하급수적으로 늘어난다는 단점이 있고, overfitting의 문제가 발생할 수도 있다.

위 식을 추정하고자 하는 계수들에 대하여 분리하여 나타내면 아래 식과 같다.

$$\begin{aligned}
I &= \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^n P_{nm}(\sin(\phi)) \cdot \cos(m\lambda) \cdot Q \cdot C_{nm} \\
&\quad + \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^n P_{nm}(\sin(\phi)) \cdot \sin(m\lambda) \cdot Q \cdot S_{nm}
\end{aligned} \tag{5-5}$$

이중차분 측정치는 2개의 수신기, 2개의 위성에서 얻어지는 총 4개의 경사 전리층 지연 측정치들의 선형 조합으로 구성된다. 각각의 경사 전리층 지연 측정치는 위에 기술한 경사 전리층 지연 측정치와 동일한 식으로 구성될 수 있으며, 이중차분 측정치는 그렇게 구성된 식의 이중차분 선형 조합으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
\Delta \nabla \hat{I} &= \Delta \nabla (I_v \cdot Q) \\
&= \Delta \nabla \left(\sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^n P_{nm}(\sin(\phi)) \cdot \{C_{nm} \cdot \cos(m\lambda) + S_{nm} \cdot \sin(m\lambda)\} \cdot Q \right)
\end{aligned}
\tag{5-6}$$

$\Delta \nabla \hat{I}$: double-difference carrier based ionospheric delay measurement

이중 차분 측정치에 대해서도 추정하고자 하는 spherical harmonics 계수들에 대해서 식을 정리하면 아래 식과 같다.

$$\begin{aligned}
\Delta \nabla \hat{I} &= \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^n \Delta \nabla \{P_{nm}(\sin(\phi)) \cdot \cos(m\lambda) \cdot Q\} \cdot C_{nm} \\
&\quad + \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^n \Delta \nabla \{P_{nm}(\sin(\phi)) \cdot \sin(m\lambda) \cdot Q\} \cdot S_{nm}
\end{aligned}
\tag{5-7}$$

다음은 위와 같이 구성되는 측정치 모델로부터 추정을 위한 관측식 구성 과정을 설명하도록 한다. 먼저 사용되는 측정치는 모든 기준국에서 수집되는 의사거리 기반 전리층 지연 측정치, 반송파 기반 이중차분 전리층 지연 측정치이다. 다음은 측정치 식을 나타낸 식이다. 기준국이 p개, 위성이 q개 있을 때를 가정하여 나타낸 식이며 이중 차분 식에서 M은 주 기준국을 표현한 것이며, A1, A2 은 부 기준국들을 표현한 것이다. 식을 간단히 표현하기 위하여 모든 기준국에서 보이는 위성의 수는 같다고 가정을 하였다.

$$z = \begin{bmatrix} z_\rho^T & z_{\Delta \nabla \phi}^T \end{bmatrix}^T
\tag{5-8}$$

$$z_\rho = \begin{bmatrix} I_1^1 & I_1^2 & \cdots & I_p^j \end{bmatrix}^T \quad (5-9)$$

$$z_{\Delta\nabla\phi} = \begin{bmatrix} {}^1_{A_1}\Delta\nabla_M^r \hat{I} & {}^2_{A_1}\Delta\nabla_M^r \hat{I} & \cdots & {}^q_{A_{p-1}}\Delta\nabla_M^r \hat{I} \end{bmatrix}^T \quad (5-10)$$

z : measurement vector for ionosphere modeling

z_ρ : pseudorange based measurement vector

$z_{\Delta\nabla\phi}$: double-difference carrier based measurement vector

위 측정치에 대한 공분산 행렬은 아래와 같이 구성 된다.

$$V = \begin{bmatrix} V_\rho & O \\ O & V_{\Delta\nabla\phi} \end{bmatrix} \quad (5-11)$$

V_{UD} : covariance matrix of pseudorange measurement vector

V_{DD} : covariance matrix of double-difference carrier measurement vector

의사거리 측정치와 반송파 측정치는 independent 하므로 위 식에서 off-diagonal 항들은 모두 0이 된다. 그리고 측정치 각각의 공분산 행렬을 나타내면 다음 식과 같다.

$$V_\rho = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \cdots & \sigma_{b,1,i}^2 & \cdots \\ \vdots & \ddots & & \cdots \\ \sigma_{b,1,i}^2 & & \sigma_i^2 & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \quad (5-12)$$

$$\sigma_{b,i,j}^2 = \begin{cases} 0 & \text{if } i \text{ and } j \text{ share no common receiver or satellite} \\ \sigma_{b,Tx}^2 & \text{if } i \text{ and } j \text{ share common satellite} \\ \sigma_{b,Rx}^2 & \text{if } i \text{ and } j \text{ share common receiver} \end{cases} \quad (5-13)$$

의사거리 기반 전리층 지연 측정치 생성시에는 기준국, 위성에 대한 IFB 값을 각각 빼주게 되는데, 같은 수신기에 대해서는 같은 수신기 IFB, 같은 위성에 대해서는 같은 IFB 값을 빼주게 되므로 off-diagonal 항에 이를 고려해야 한다.

$$V_{\Delta\nabla\phi} = \begin{bmatrix} \sigma_{\Delta\nabla\phi(1,1)}^2 & \sigma_{1\Delta_M^r\phi}^2 & \cdots & \sigma_{1\nabla_M^r\phi}^2 & \sigma_{\phi^r}^2 & \cdots \\ \sigma_{1\Delta_M^r\phi}^2 & \sigma_{\Delta\nabla\phi(1,2)}^2 & \cdots & \sigma_{\phi^r}^2 & \sigma_{2\nabla_M^r\phi}^2 & \cdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \sigma_{\phi^r}^2 & \sigma_{\phi^r}^2 & \cdots \\ \sigma_{1\nabla_M^r\phi}^2 & \sigma_{\phi^r}^2 & \cdots & \sigma_{\Delta\nabla\phi(2,1)}^2 & \sigma_{2\Delta_M^r\phi}^2 & \cdots \\ \sigma_{\phi^r}^2 & \sigma_{2\nabla_M^r\phi}^2 & \cdots & \sigma_{2\Delta_M^r\phi}^2 & \sigma_{\Delta\nabla\phi(2,2)}^2 & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \quad (5-14)$$

$$\sigma_{\Delta\nabla\phi(i,j)}^2 = \sigma_{\phi_i^j}^2 + \sigma_{\phi_i^r}^2 + \sigma_{\phi_M^j}^2 + \sigma_{\phi_M^r}^2 \quad (5-15)$$

$$\sigma_{i\Delta_M^r\phi}^2 = \sigma_{\phi_i^r}^2 + \sigma_{\phi_M^r}^2$$

$$\sigma_{1\nabla_M^r\phi}^2 = \sigma_{\phi_M^1}^2 + \sigma_{\phi_M^r}^2$$

$\sigma_{\Delta\nabla\phi(i,j)}^2$: variance of double-difference measurement observed from i -th auxiliary station and j -th satellite

이중차분 측정치에서 diagonal 항은 이중 차분 시 사용되는 4개의 반송파 측정치 각각의 분산을 더하여 계산을 할 수 있다. Off-diagonal 항의 경

우 같은 기준국 측정치들 간에는 주 기준국과 해당 기준국의 기준 위성에 대한 측정치를 공유하므로 이를 고려해야 한다. 그리고 서로 다른 기준국이지만 같은 위성을 공유하는 경우 주 기준국의 위성 및 기준 위성에 대한 측정치를 공유하므로 이를 고려해야 한다. 그리고 이외의 항들에는 주 기준국의 기준 위성 측정치에 대한 분산 값이 모두 들어가야 한다.

위와 같이 구성된 측정치에서 구해야 할 상태변수는 spherical harmonics 계수이며 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$x = [C_{00} \quad \cdots \quad C_{NN} \quad S_{NN}]^T \quad (5-16)$$

측정치, 상태변수가 정의 되었으므로 추정을 위해서는 측정치와 상태변수의 관계를 나타내는 관측 행렬을 구성해야 한다. 먼저 의사거리 측정치에 대한 관측행렬을 구성하면 다음과 같다.

$$H_\rho = \begin{bmatrix} P_{00}(\sin \phi_A^1) \cdot \cos(0 \cdot \lambda_A^1) \cdot Q_A^1 & \cdots & P_{nm}(\sin \phi_A^1) \cdot \cos(m \cdot \lambda_A^1) \cdot Q_A^1 & P_{nm}(\sin \phi_A^1) \cdot \sin(m \cdot \lambda_A^1) \cdot Q_A^1 \\ P_{00}(\sin \phi_A^2) \cdot \cos(0 \cdot \lambda_A^2) \cdot Q_A^2 & \cdots & P_{nm}(\sin \phi_A^2) \cdot \cos(m \cdot \lambda_A^2) \cdot Q_A^2 & P_{nm}(\sin \phi_A^2) \cdot \sin(m \cdot \lambda_A^2) \cdot Q_A^2 \\ \vdots & & \vdots & \vdots \\ P_{00}(\sin \phi_M^j) \cdot \cos(0 \cdot \lambda_M^j) \cdot Q_M^j & \cdots & P_{nm}(\sin \phi_M^j) \cdot \cos(m \cdot \lambda_M^j) \cdot Q_M^j & P_{nm}(\sin \phi_M^j) \cdot \sin(m \cdot \lambda_M^j) \cdot Q_M^j \end{bmatrix} \quad (5-17)$$

H_ρ : observation matrix for pseudorange based ionospheric delay measurement

다음으로 이중차분 반송파 기반 전리층 지연 측정치에 대하여 구성된 관측 행렬은 다음과 같다.

$$H_{\Delta\nabla\phi} = \begin{bmatrix} {}^1_{AI}\Delta\nabla'_M \{P_{00}(\sin\phi) \cdot \cos(0 \cdot \lambda) \cdot Q\} & \cdots & {}^1_{AI}\Delta\nabla'_M \{P_{nm}(\sin\phi) \cdot \cos(m \cdot \lambda) \cdot Q\} & {}^1_{AI}\Delta\nabla'_M \{P_{nm}(\sin\phi) \cdot \sin(m \cdot \lambda) \cdot Q\} \\ {}^2_{AI}\Delta\nabla'_M \{P_{00}(\sin\phi) \cdot \cos(0 \cdot \lambda) \cdot Q\} & \cdots & {}^2_{AI}\Delta\nabla'_M \{P_{nm}(\sin\phi) \cdot \cos(m \cdot \lambda) \cdot Q\} & {}^2_{AI}\Delta\nabla'_M \{P_{nm}(\sin\phi) \cdot \cos(m \cdot \lambda) \cdot Q\} \\ \vdots & & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \quad (5-18)$$

H_{DD} : observation matrix for double-difference carrier based ionospheric delay measurment

위 식들은 최종적으로 측정치, 관측행렬, 상태변수의 간단한 꼴로 표현이 되며 이를 나타내면 아래 식과 같다.

$$\begin{aligned} z &= Hx \\ &= \begin{bmatrix} H_\rho \\ H_{\Delta\nabla\phi} \end{bmatrix} x \end{aligned} \quad (5-19)$$

③ 추정 기법

측정치, 관측행렬, 상태변수에 대한 정의 및 식이 정리가 되었고, 최종적으로 정의된 관측식으로부터 추정하고자 하는 상태 변수 값을 추정을 하게 된다. 위와 같이 구성된 선형 방정식의 해를 구하는 대표적인 추정 기법으로는 weighted least square 기법이 있다. Weighted least square 기법은 아래와 같은 성능지수를 최소화 시키는 추정 값과 추정 분산을 계산하는 기법이다.

$$J_{WLS} = \frac{1}{2} (\mathbf{z} - \mathbf{H}\mathbf{x})^T \mathbf{W}^{-1} (\mathbf{z} - \mathbf{H}\mathbf{x}) \quad (5-20)$$

위 성능 지수는 측정 모델 식의 가중치가 고려된 잔차를 의미한다. 즉,

구성된 관측식의 오차가 최소화되도록 상태변수를 추정하면서 가중치를 고려하여 가중치가 높은 측정치에 대해서 더욱 오차를 줄이도록 하는 것이다. Weighted least square 추정 값과 분산은 아래와 같은 식으로 계산된다.

$$\hat{\mathbf{x}}_{WLS} = (\mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{z} \quad (5-21)$$

$$\hat{\mathbf{P}}_{WLS} = (\mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{H})^{-1} \quad (5-22)$$

\mathbf{W} : weighting matrix

위 추정 식에서 가중치 행렬은 일반적으로 측정치의 분산에 반비례하도록 설정된다.

다른 추정 기법으로는 minimum variance 추정 기법이 있다. Weighted least square 기법의 경우 추정되는 값의 크기에 대한 제한을 두지 않으므로 추정된 값이 아주 크게 나타나는 경우가 발생 할 수 있다. 추정 결과를 그대로 사용하는 경우에는 큰 문제가 없으나 SBAS 에서와 같이 추정된 값을 메시지화 하여 정보를 전달해야 하는 경우에는 메시지의 용량이 너무 커져야 하는 문제가 발생한다. 이러한 문제를 극복하기 위하여 SBAS 위성 보정 정보를 추정할 때, priori information을 기반으로 하는 minimum variance 추정 기법이 제안 된 바 있다 [15, 77]. 추정 하고자 하는 상태 변수의 평균 값과 분산 값을 입력 변수로 하여 추정되는 변수의 범위를 정 할 수 있다. Minimum variance 추정 기법의 성능 지수 및 추정 값, 추정 분산 식을 나타내면 아래와 같다.

$$J_{MV} = \frac{1}{2}(\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}})^T \mathbf{\Lambda}^{-1}(\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}}) + \frac{1}{2}(\mathbf{z} - \mathbf{H}\mathbf{x})^T \mathbf{W}^{-1}(\mathbf{z} - \mathbf{H}\mathbf{x}) \quad (5-23)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{MV} = (\mathbf{\Lambda}^{-1} + \mathbf{H}^T \mathbf{W}^{-1} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{W}^{-1} \mathbf{z} \quad (5-24)$$

$$\hat{\mathbf{P}}_{MV} = (\mathbf{\Lambda}^{-1} + \mathbf{H}^T \mathbf{W}^{-1} \mathbf{H})^{-1} \quad (5-25)$$

$\mathbf{\Lambda}$: priori state

$\mathbf{\Lambda}$: priori covariance

Minimum variance 추정 기법은 의도적으로 추정되는 값의 크기를 제한하는 것이므로 단순 least square 보다 관측식에 대한 오차가 증가하게 된다. 그러나 least square의 경우 추정되는 값이 너무 크게 되어 메시지를 만들 수 없는 문제가 존재하므로 minimum variance 기법을 적용하여 추정을 하였다. Priori covariance 값의 설정에 대해서는 메시지 생성 파트에서 더 자세히 다루도록 한다.

3) 메시지 생성

제안된 모델링 방식에서 degree 3일 때를 기준으로 보내야 할 정보는 계수 값 16개, 공분산 행렬의 element 값 256개이다. 공분산 행렬의 경우 cholesky decomposition을 수행하는 경우 공분산 행렬을 upper triangle의 꼴을 가진 matrix의 곱으로 표현할 수 있으며, 이것을 활용하면 메시지량을 반가까이 줄 일 수 있다. Cholesky decomposition을 수행 할 경우 보내야 할 값의 개수는 136개이다.

본 연구에서는 현재 운용 중인 실제 시스템과 유사한 수준의 메시지 수에서 제안하는 방식이 어떠한 성능을 보이는지를 확인하고, 메시지 안을 제시

하였다. 현재 운용중인 SBAS 중에서 미국의 WAAS는 24개의 메시지, 일본의 MSAS는 12개의 메시지로 전리층 보정정보를 제공하고 있다. WAAS의 경우 24개의 메시지를 사용하더라도 메시지 전송간격 요구조건을 만족하면서 잘 운영되고 있으므로 24개 이하일 경우 메시지 스케줄링에 문제가 없을 것으로 판단하였다.

보정정보와 무결성 정보의 비율이 8배 정도이므로, 보정 메시지로 1개를 할당한다고 하면 8개의 무결성 정보를 합하여 9개의 메시지가 할당된다. 이 경우에는 충분한 resolution을 확보하기가 힘들었으므로 보정 메시지에 2개를 할당하고, 무결성 정보에 16개를 할당하여 분석을 수행하였다. 이 경우 총 18개의 메시지로 미국, 일본의 메시지에 중간 정도에 해당하는 메시지를 할당하게 된다.

메시지 1개당 bit 수는 212bit로 정해져 있으므로 각 보정정보, 무결성 정보 파라미터에 얼마의 숫자까지 표현이 가능한지 결정된다. 보정 정보를 2개, 무결성 정보를 16개의 메시지로 결정하면 보정 정보의 경우 파라미터 한 개당 26bit, 무결성 정보의 경우 24bit까지 할당이 된다.

Minimum variance estimator의 priori covariance 값을 어떻게 설정하는지에 따라서 추정되는 계수 및 분산의 크기가 결정 되는데, 추정되는 값의 크기를 더 많이 제한 할수록 모델링 정확도는 떨어지게 된다. 따라서 제한을 적게 하되 메시지가 허용되는 범위 안에서 값이 추정 되어야 한다. 또한까지 고려해야 할 사항은 값의 resolution이다. 추정되는 값을 그대로 보낼 수 없으며 적절한 resolution을 가질 수 있도록 scale factor를 설정한다. 추정 되는 계수의 최대 크기와 메시지 용량, scale factor 사이에는 다음과 같은 관계로 나타낼 수 있다.

$$Max\{C_{nm}\} = M \times S \quad (5-26)$$

M : message capacity

S : scaling factor

메시지의 용량은 앞서 설정된 메시지 개수에 따라서 정해져 있으며 추정되는 계수의 크기는 priori sigma 값에 의해 범위가 결정된다. Minimum variance 기법을 사용하는 경우 일반적인 상황에서는 priori sigma의 3배수 안에서 값들이 추정된다.

$$3\Lambda > M \times S \quad (5-27)$$

가능한 높은 resolution을 가질 수 있도록 scale factor를 작게 설정해야 하는데 설정된 priori sigma, 메시지 용량에 대하여 scale factor는 다음 식으로부터 결정한다.

$$S < 3\Lambda / M \quad (5-28)$$

메시지 용량이 정해져 있으므로 설정되는 sigma 값에 따라서 값이 커질수록 높은 scale factor가 설정된다. Priori sigma 값이 커질수록 추정 값을 적게 제한하므로 추정 성능이 좋아질 수 있지만 scale factor 값이 커지므로 메시지화 과정에서 성능이 저하될 수 있다. 반대로 sigma 값이 작을수록 추정 값을 많이 제한하므로 추정 성능이 안 좋아질 수 있지만 scale factor 값이 작아지므로 메시지화 과정의 성능 손실이 적다. 본 연구에서는 여러 priori sigma 값을 설정하여 모델링 및 메시지화를 수행한 후 사용자에게 나타나는 range 오차가 가장 작아지는 값을 찾음으로써 적절한 priori sigma 값을 선택하였다.

Figure 5-11은 위 과정을 거쳐 분석된 사용자의 전리층 지연 잔차를 나타낸 그래프이다. $10^2 \sim 10^5$ 까지 priori sigma 값을 변경해가면 테스트를 수행하였다. Priori sigma 값이 커질수록 계수 추정 발생하는 제한이 더 작아지므로 추정 성능이 올라가 오차가 작게 발생하는데, 10^4 보다 커지는 경우에는 메시지화에 의한 오차가 크게 발생하여 오차가 증가한다. 즉, Priori sigma 값을 10^4 로 설정 했을 때, 가장 작은 오차가 사용자에게 나타나는 것을 확인하였으며 이를 priori sigma 값으로 설정하였다.

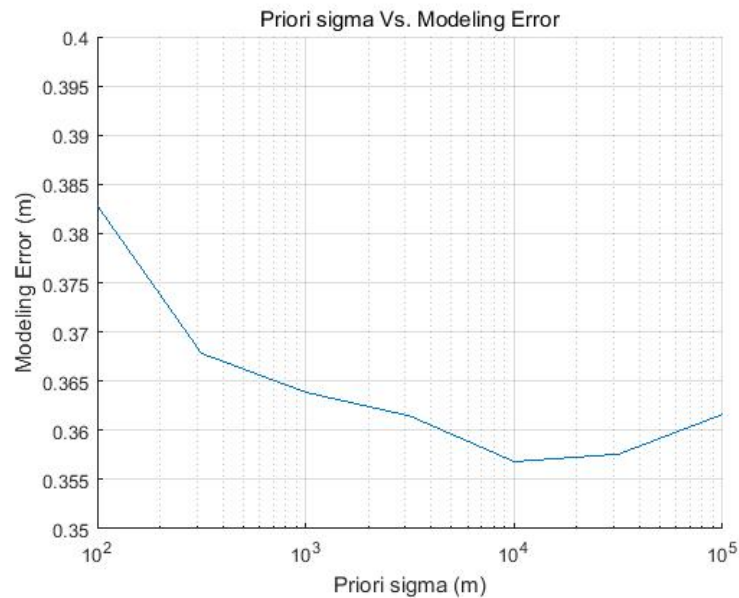


Figure 5-11 RMS of modeling residual error versus priori sigma

Table 5-1, Table 5-2은 정보와 무결성 정보에 대하여 설정한 구체적인 메시지 안을 나타낸 표이다.

Table 5-1 Message for correction

	No. of Bits	Scale Factor	Effective range	Units
Each Spherical harmonics coefficients	26	0.001	$\pm 10^{-3} \cdot 2^{25}$	-
Spare	4	-		

Table 5-2 Message for integrity

	No. of Bits	Scale Factor	Effective range	Units
Each element	24	0.003	$\pm 0.003 \cdot 2^{23}$	-
Spare	4	-		

Figure 5-12, Figure 5-13는 각각 계수와 계수의 분산 값에 대해 메시지화된 결과가 메시지 허용량을 초과하지 않는지 검증하기 위하여 나타낸 메시지 크기의 분포이다.

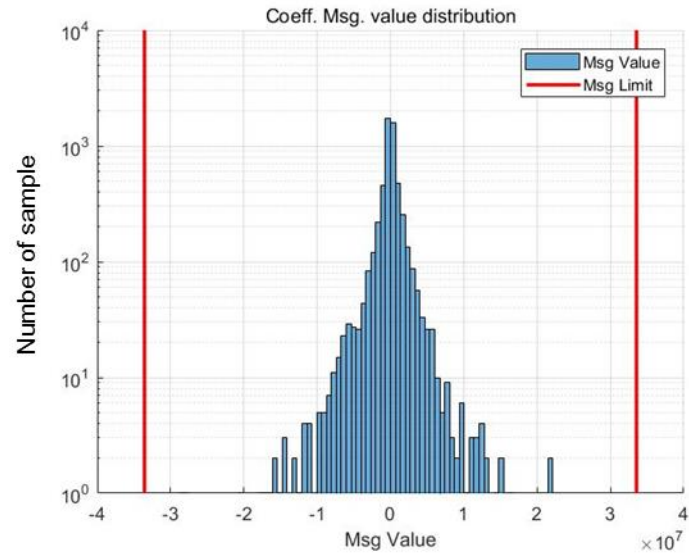


Figure 5-12 distribution of spherical harmonics coefficient

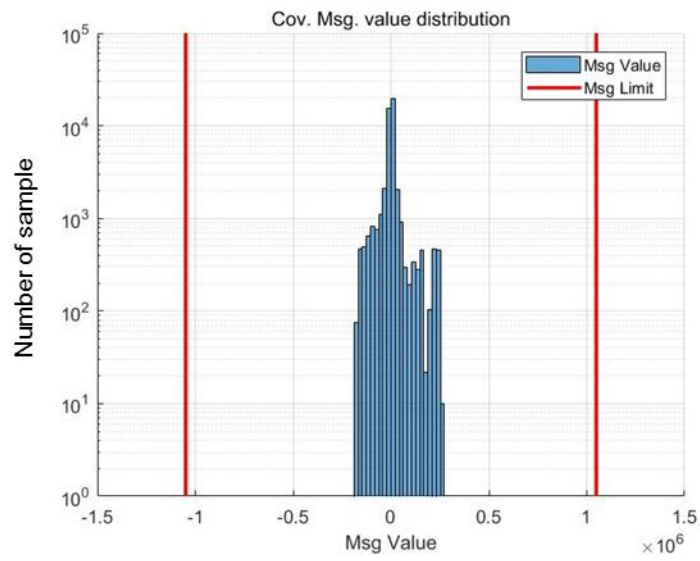


Figure 5-13 distribution of covariance element of spherical harmonics coefficient

두 가지의 메시지 모두 허용량을 초과하지 않는 범위에서 메시지화가 수행된 것을 확인할 수 있다.

3. 사용자 적용 알고리즘

1) 보정 정보 적용 알고리즘

추정된 spherical harmonics 계수를 전달 받는 경우, 원하는 위치의 전리층 지연 값을 계산할 수 있다. 먼저 사용자는 사용자가 바라보는 위성이 전리층을 지나는 통과 점을 먼저 계산해야 한다. 그러면 해당 위치를 바탕으로 앞서 의사거리 측정치에 대하여 spherical harmonics 식을 구성했던 것과 같이 관측행렬을 구성한다. 아래 식은 사용자에게 대하여 구성된 관측식을 나타낸 것이다.

$$H_{User} = \begin{bmatrix} P_{00}(\sin \phi_U^1) \cdot \cos(0 \cdot \lambda_U^1) & \cdots & P_{nm}(\sin \phi_U^1) \cdot \cos(m \cdot \lambda_U^1) & P_{nm}(\sin \phi_U^1) \cdot \sin(m \cdot \lambda_U^1) \\ P_{00}(\sin \phi_U^2) \cdot \cos(0 \cdot \lambda_U^2) & \cdots & P_{nm}(\sin \phi_U^2) \cdot \cos(m \cdot \lambda_U^2) & P_{nm}(\sin \phi_U^2) \cdot \sin(m \cdot \lambda_U^2) \\ \vdots & & \vdots & \vdots \\ P_{00}(\sin \phi_U^P) \cdot \cos(0 \cdot \lambda_U^P) & \cdots & P_{nm}(\sin \phi_U^P) \cdot \cos(m \cdot \lambda_U^P) & P_{nm}(\sin \phi_U^P) \cdot \sin(m \cdot \lambda_U^P) \end{bmatrix} \quad (5-29)$$

ϕ_U^j : latitude of user IPP

λ_U^j : longitude of user IPP

그러면 구하고자 하는 IPP에서의 수직 전리층 지연 값을 아래와 같은 식으로 계산할 수 있다.

$$I_{V,User} = H_{User} \cdot x_{Msg} \quad (5-30)$$

$I_{V,User}$: vertical ionospheric delay correction at the user IPP

x_{Msg} : spherical harmonics coefficient message

위 식은 수직 전리층 지연 오차에 대한 값으로 실제 사용자의 의사거리를 보정하기 위하여 경사 지연 값으로 변환하는 과정이 필요하며 다음은 변환 식을 나타낸 것이다.

$$I_{User} = I_{V,User} \cdot Q_{User} \quad (5-31)$$

I_{User} : slant ionospheric delay correction at the user IPP

Q_{User} : obliquity factor of user

2) 무결성 정보 적용 알고리즘

① 무결성 정보 적용

사용자가 전달 받는 정보는 추정된 분산을 cholesky decomposition한 upper triangle 행렬의 항들이다. 무결성 정보의 적용을 다시 공분산 행렬로 바꿔주는 것이 필요하다.

$$P_{Msg} = U_{Msg}^T \cdot U_{Msg}$$

P_{Msg} : covariance matrix calculated from message

U_{Msg} : upper triangle matrix (integrity message)

앞서 보정 정보 적용에서 사용자의 IPP에 맞는 관측행렬을 구성하여 보정 값을 계산한 바 있다. 무결성 정보의 계산은 그 과정을 그대로 적용하여 수행된다. 위 식에서 계산한 공분산 행렬이 의미하는 바가 추정된 계수 값의 오차 수준이므로 사용자 IPP 위치에서의 오차수준을 계산하는 식은 아래와 같다.

$$\sigma_{V,User}^2 = H_{User} \cdot P_{Msg} \cdot H_{User}^T$$

$\sigma_{V,User}^2$: estimated variance of vertical ionospheric correction at the user IPP

② Spherical harmonics 모델의 decorrelation 오차를 고려한 sigma 보정

기본 적인 사용자 무결성 정보는 앞서 기술한 식과 같이 계산 될 수 있으나 사용자는 그 이외에 다른 요인으로 인한 분산 값 보정이 필요하다. 앞서 기술한 무결성 정보 계산은 모델이 완벽하다는 가정에서 계산된 값이지만 실제로는 완벽한 측정치를 가지고 있는 경우에도 그 값을 모델 결과가 완전히 쫓아가지는 못하며 오차가 발생한다. 즉, 오차가 없는 실제 값을 활용해 모델링을 수행한 결과를 실제 값과 대조하면 차이가 존재한다. 이러한 오차는 실제 값의 형상과 모델링 기법의 해상도와 직접적으로 연관이 있다.

기존의 planar fit 알고리즘에서는 실제 수직 전리층 값의 형상이 모델에서 가정하는 면의 형상과 차이가 나는 값을 decorrelation error라 정의하고 분석을 수행한 바 있다 [78, 79]. kriging 기법에서는 데이터의 공간적

분포의 상관성을 의미하는 variogram 의 개념을 도입하여 이에 대한 고려를 하고 있다 [56, 57].

Decorrelation 오차 수준은 통계적인 방법으로 계산한다. 모델링하는 데이터의 실제 값을 활용하여 모델링을 수행하고 잔여 오차를 계산하면 decorrelation 오차를 계산할 수 있다. 계산된 오차의 통계를 내어 사용자가 무결성 정보 계산시 이로 인한 오차를 고려할 수 있도록 한다.

Figure 5-14은 시뮬레이션을 통하여 true 수직 전리층 데이터를 spherical harmonics로 모델링 했을 때의 잔차를 계산한 결과이다.

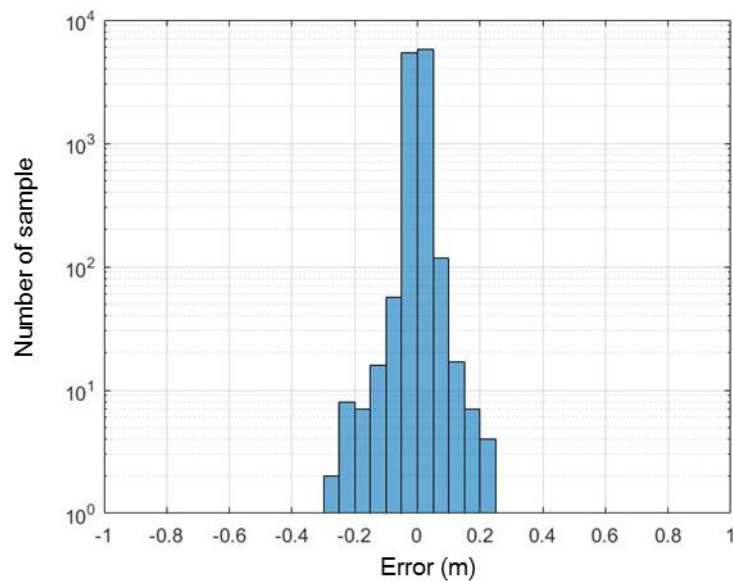


Figure 5-14 decorrelation error for spherical harmonics
(simulation)

True 값을 활용하여 모델링 했음에도 불구하고 모델이 완벽히 따라가지

못하는 오차가 발생하며 최대 20cm 정도 수준까지 오차가 발생하였다.

시뮬레이션의 경우 IONEX 데이터를 보간하여 만든 값을 true로 사용하고 있어 매끄러운 형상을 가지고 있다. 그러나 실제 데이터의 경우에는 시뮬레이션만큼 매끄러운 형상의 데이터를 가지지 못하므로 시뮬레이션보다 decorrelation 오차가 커지게 된다. 실제 데이터의 true 값은 Leveled carrier 측정치에 IFB 값을 보상하여 최대한 오차를 보상하여 만들었으며 그로부터 출력되는 전리층 맵을 출력하였다. Figure 5-15는 전리층 맵 예시를 나타낸 것이다.

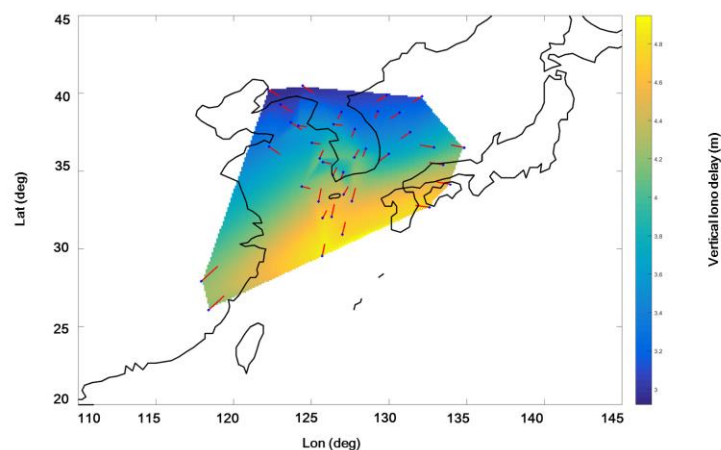


Figure 5-15 Ionosphere Map example
(Real data, 2014/09/01, GPS Time : 96060)

전리층 맵에서 측정치의 위치와 함께 IPP를 지나는 방향을 표시하였다. IPP 마다 방향을 표시하는 선의 길이는 양각에 따라 달라지게 하였으며, 양각이 낮을수록 길이가 길어지도록 나타내었다. 출력된 전리층 맵들을 살펴

본 결과, 인접한 위치에서도 수직 전리층 값이 크게 변하는 영역들이 존재함을 확인하였다. 특히 인접한 전리층 통과 점에 위치한 각 측정치가 각각 남쪽, 북쪽을 향하여 지나게 될 때, 차이가 크게 발생했으며 이러한 현상의 원인에는 전리층 연구에서 가정하고 있는 shell 모델의 오차가 기여하고 있다. 실제 3차원 상에서 분포하고 있는 전리층을 2차원의 shell로 가정을 하게 됨으로써 오차가 발생하게 된다. 이로 인해 인접한 IPP 에서도 차이가 큰 수직 전리층 지연 값이 획득될 수 있으며 모델링 오차가 증가할 수 있다. Figure 5-16, Figure 5-17는 2014년 9월 1일, 9월 12일 실측 데이터에 대하여 기준 값으로 삼고 있는 leveled carrier 측정치에 대하여 모델링을 수행했을 때 발생하는 모델링 오차를 나타낸 그림이다. 이후 실측데이터 테스트 환경에서 자세히 설명되겠지만 9월 1일보다 9월 12일에 전리층이 더 활발하였고, 전리층이 더 활발한 날에 대해서 decorrelation 오차가 더 크게 발생하는 것을 확인할 수 있다.

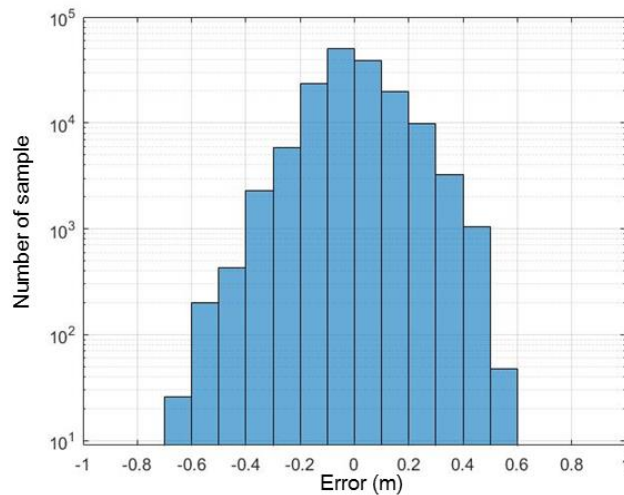


Figure 5-16 decorrelation error for spherical harmonics (real data, 2014.09.01)

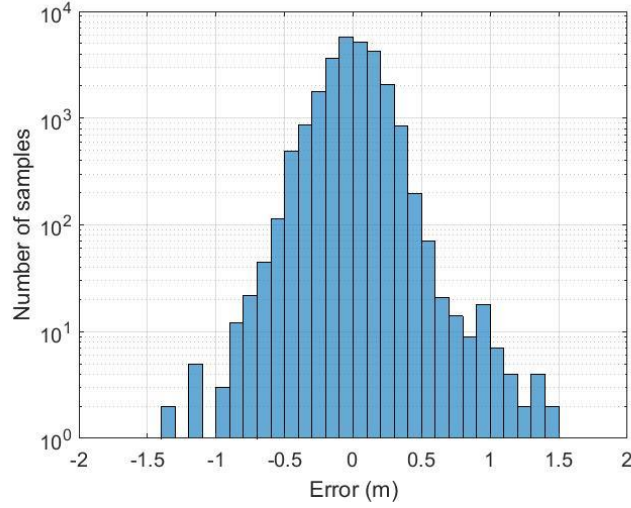


Figure 5-17 decorrelation error for spherical harmonics (real data, 2014.09.12)

본 연구에서는 위 그림에서 나타난 spherical harmonics 모델의 decorrelation 오차를 bound 할 수 있는 sigma 값을 0.5 m 로 설정하고 실제 사용자 적용 시에는 계산된 수직 보정정보의 오차 수준에 더해주었다.

$$\sigma_{V,User}^2 = \sqrt{(H_{User} \cdot P_{Msg} \cdot H_{User}^T)^2 + \sigma_{decor}^2} \quad (5-32)$$

σ_{decor}^2 : variance of decorrelation error of spherical harmonics model

위 식은 수직 전리층에 대한 분산 값이므로 실제 의사거리 보정정보로 만들 때에는 obliquity factor를 고려해야 한다. 다음은 사용자 의사거리 보정정보로 변환했을 때의 오차수준을 나타낸 식이다.

$$\sigma_{User}^2 = \sigma_{V,User}^2 \cdot Q_{User} \quad (5-33)$$

σ_{User}^2 : variance of slant ionospheric correction at the user IPP

4. 시뮬레이션 테스트

1) 테스트 환경

시뮬레이션 테스트를 위한 데이터는 IGS에서 제공하는 IONEX 데이터를 활용하여 수행되었다. 이후 실측 데이터 분석에서 사용된 2014년 9월 1일의 데이터를 12시간 동안 분석하였다. 활용되는 기준국도 실측 데이터 테스트와 일치시켰으며 Figure 5-18는 기준국과 성능 분석에 사용된 사용자 위치를 나타낸 그림이다.

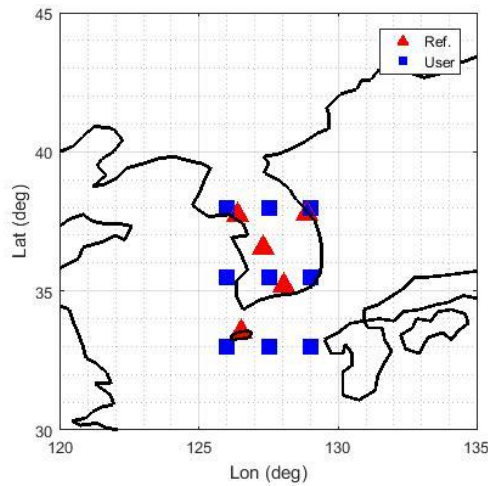


Figure 5-18 reference station and user (simulation)

제주, 강화, 진주, 강릉, 세종 기준국이 보정 정보 생성을 위한 기준국으로 선정되었으며 사용자는 그림에서 보이는 것과 같이 일정 간격의 격자로 생성하였다.

2) 테스트 결과

모델링 성능의 결과는 각각의 사용자에게 보정정보를 적용하였을 때 발생하는 오차를 기준으로 분석되었다. 제안한 방법의 유효성을 검증하기 위하여 이중 차분 측정치를 적용함에 따른 모델링 결과를 분석하였다. 의사거리 측정치만을 사용했을 때의 spherical harmonics 모델링 결과, 이중 차분 측정치만을 사용했을 때의 모델링 결과를 비교하고, 최종적으로 제안한 의사거리, 이중 차분 측정치를 동시에 활용했을 때의 모델링 결과를 함께 비교를 하였다. 또한 기존의 SBAS 전리층 모델링 알고리즘 대비 나타나는 성능 개선을 확인해보기 위하여 IDW, kriging 알고리즘을 구현하여 비교를 수행하였다.

① 의사거리, 반송파 측정치를 활용한 모델링 비교

첫 번째 시뮬레이션에서는 의사거리, 반송파 측정치를 각각 활용하여 모델링을 수행할 경우 나타나는 결과에 대해서 분석한 결과이다. Figure 5-19은 시뮬레이션 환경을 나타낸 그림이다. True 값으로 사용된 IONEX 데이터를 보간하여 나타낸 그림이다.

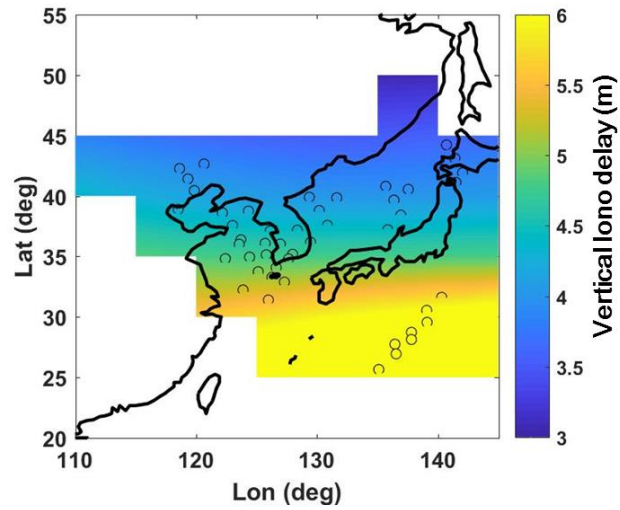


Figure 5-19 simulation environment (1 epoch, IONEX data)

그림에서 scatter plot으로 표시된 동그란 표시는 측정치가 수집되는 위치를 의미한다. 이러한 전리층 환경에서 수집된 의사거리, 반송파 측정치에 발생하는 의사거리, 이중차분 반송파 기반 전리층 지연 측정치의 오차는 각각 Figure 5-20, Figure 5-21와 같다.

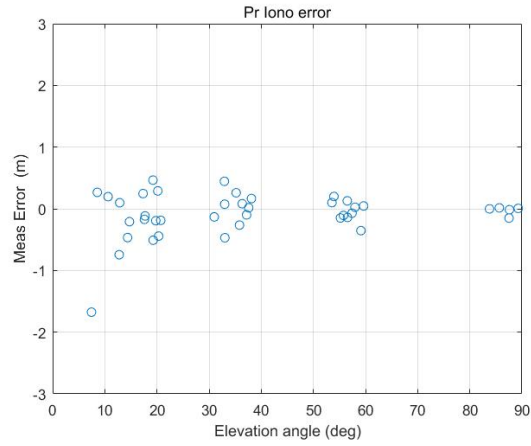


Figure 5-20 pseudorange measurement error versus elevation angle
(simulation, 1 epoch)

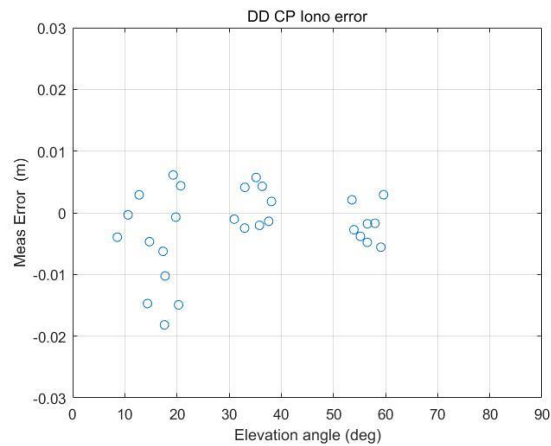


Figure 5-21 double-difference carrier measurement error versus elevation
angle (simulation, 1 epoch)

양각에 따라 큰 오차를 보이고 있음을 확인할 수 있으며 오차 수준은 대략 100배 차이가 난다. 위와 같은 시뮬레이션 환경에서 각각 의사거리, 반송파 측정치를 활용하여 전리층 맵을 추정하고 결과를 분석하였다. Figure

5-22는 의사거리 측정치로 수행된 모델링 결과이고, Figure 5-23은 반송파 측정치로 수행된 모델링 결과이다.

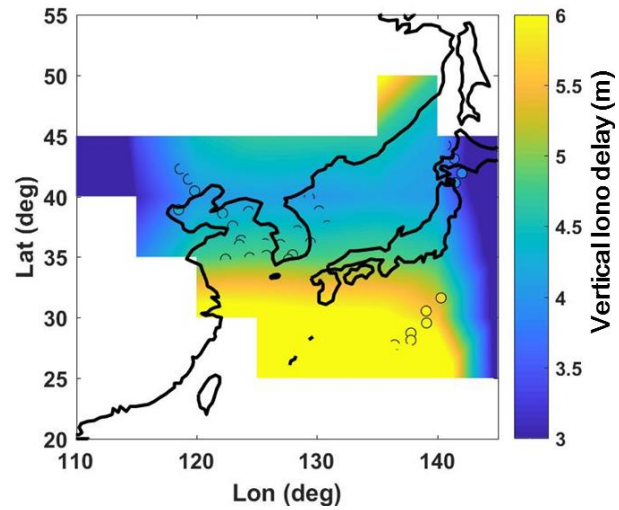


Figure 5-22 ionosphere modeling result using pseudorange
(simulation, 1 epoch)

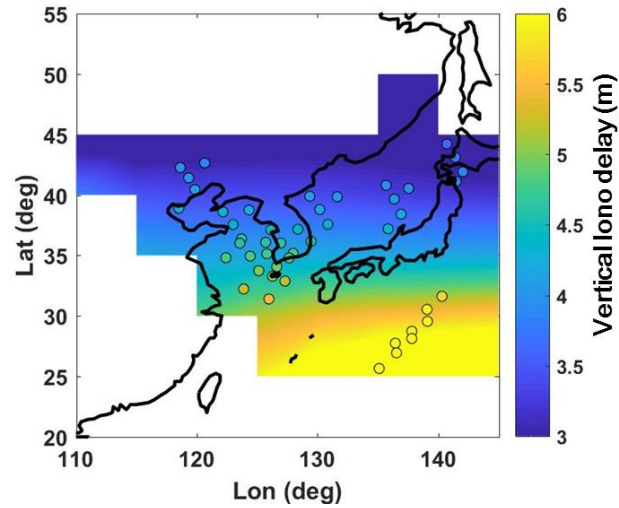


Figure 5-23 ionosphere modeling result using double-difference carrier phase
(simulation, 1 epoch)

의사거리 측정치로 모델링한 경우, 낮은 양각의 측정치 오차로 인하여 실제 전리층 맵 대비 저양각 주변에서 차이가 커지는 것을 볼 수 있다. 반면에 반송파 측정치 기반으로 모델링한 결과는 전체적으로 실제 전리층보다 큰 값을 보였다. 이 때, 각각의 모델링 오차를 나타내면 Figure 5-24과 Figure 5-25와 같다.

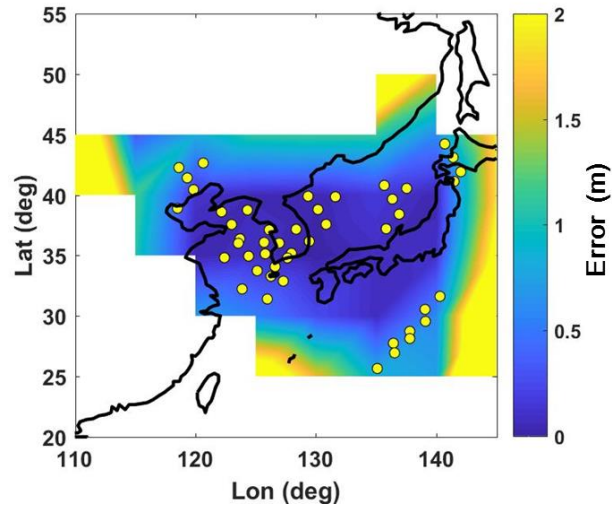


Figure 5-24 ionosphere modeling error when using pseudorange (simulation, 1 epoch)

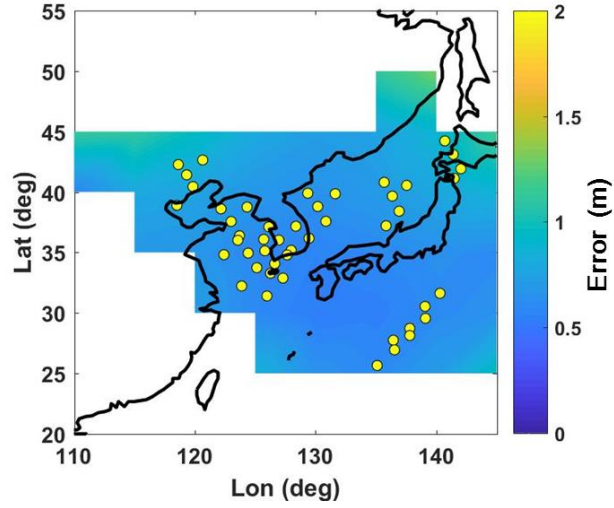


Figure 5-25 ionosphere modeling error when using double-difference carrier phase measurement (simulation, 1 epoch)

반송파 기반 모델링의 경우 전체적으로 0.8m 수준의 바이어스 오차가 발생했다. 이 바이어스 오차를 보상하여 반송파 활용 추정 결과의 그림을 다시 그리면 다음과 같다.

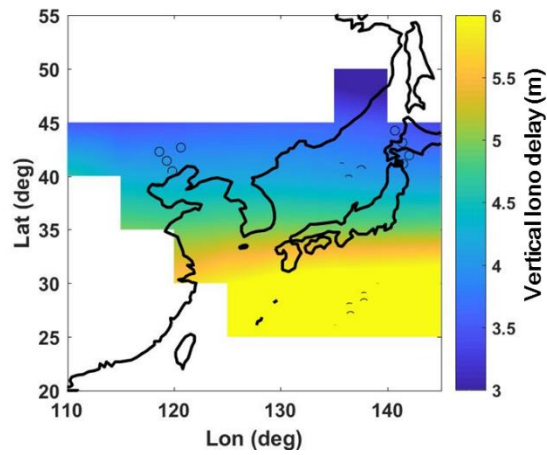


Figure 5-26 ionosphere modeling result using double-difference carrier phase (bias removed, simulation, 1 epoch)

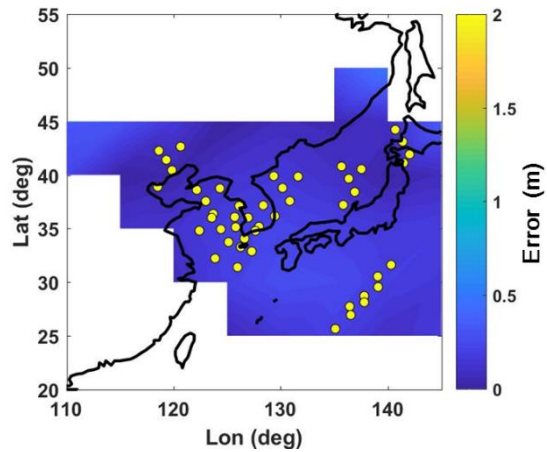


Figure 5-27 ionosphere modeling error when using double-difference carrier phase measurement (bias removed, simulation, 1 epoch)

바이어스를 제거한 경우 이중차분 반송파 기반의 모델링 결과는 실제 전리층과 거의 유사한 모습을 보이고 있으며 전체 영역에 대해서 작은 오차 수준을 보이고 있다. 즉, 전리층 모델링 개념도에서 예상했던 바와 같이 의사거리 기반 모델링은 측정치 오차가 큰 외곽 영역에서 문제를 보이고, 반송파 기반 모델링은 전체적인 형상은 유사하지만 바이어스 오차가 있는 문제를 보인다.

이러한 상황에서 제안한 방법대로 의사거리, 반송파 측정치를 모두 활용하여 모델링을 수행해보았고, Figure 5-28는 제안된 방법의 모델링 결과를 나타낸다.

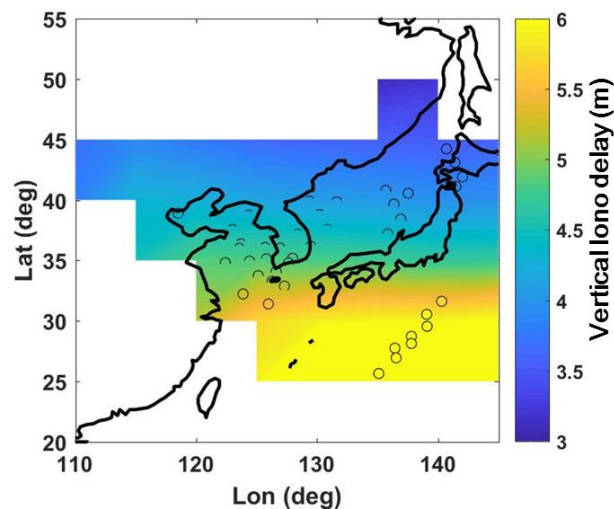


Figure 5-28 ionosphere modeling result using pseudorange and double-difference carrier phase (simulation, 1 epoch)

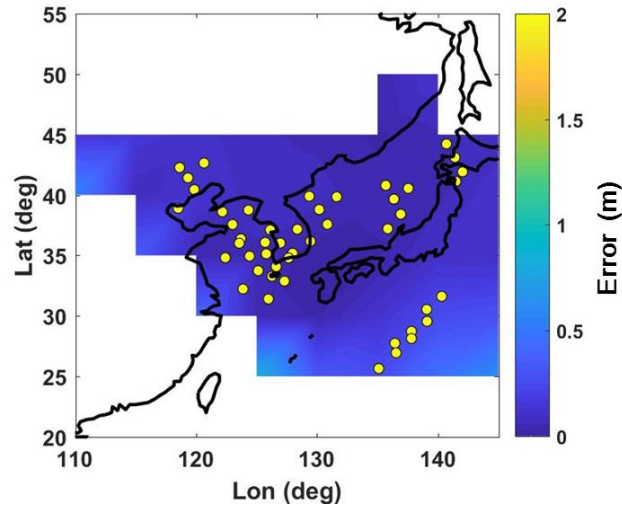


Figure 5-29 ionosphere modeling error using pseudorange and double-difference carrier phase (simulation, 1 epoch)

의사거리의 차분되지 않은 절대적인 값의 정보와 이중차분 반송파 위상의 상대적인 값의 정보를 동시에 활용함으로써 각각을 사용했을 때 발생하는 문제가 사라지며 가장 실제 전리층과 유사한 형태로 모델링 되는 것을 확인할 수 있다.

② 사용자 의사거리 영역 테스트 결과

제안된 방법을 적용했을 때, 실제 사용자에게 나타나는 성능을 분석해보기 위하여 시뮬레이션을 수행하였다. 앞서 Figure 5-18에 표현된 것과 같이 총 9개의 사용자 위치를 두고 분석을 수행하였다.

전리층 모델링을 IDW, kriging, 의사거리 기반 spherical harmonics, 의사거리, 반송파 기반 spherical harmonics의 총 4가지 방법으로 수행하고 보정정보를 생성하여 적용하였다. 실제 사용자 의사거리에 보정정보를 적용

했을 때 나타나는 오차를 보기 위하여 각각의 보정정보로부터 사용자의 의 사거리 보정 정보를 계산하고 실제 값과 차이를 오차로 계산하였다.

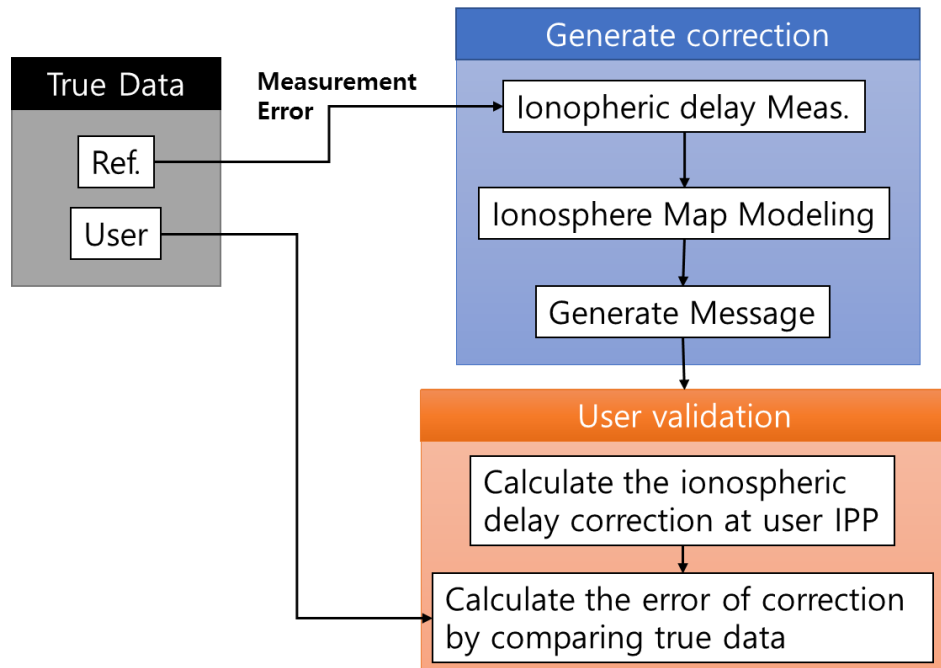


Figure 5-30 Performance evaluation method in range domain (simulation)

다음은 위 분석 방법대로 계산된 사용자의 보정정보 적용 후에 남는 잔여 오차에 대하여 나타낸 그래프이다. Figure 5-31은 시간에 따른 보정 정보 적용 후의 오차를 나타낸 그래프이며 Figure 5-32은 양각에 따른 RMS 오차를 나타낸 그래프이다.

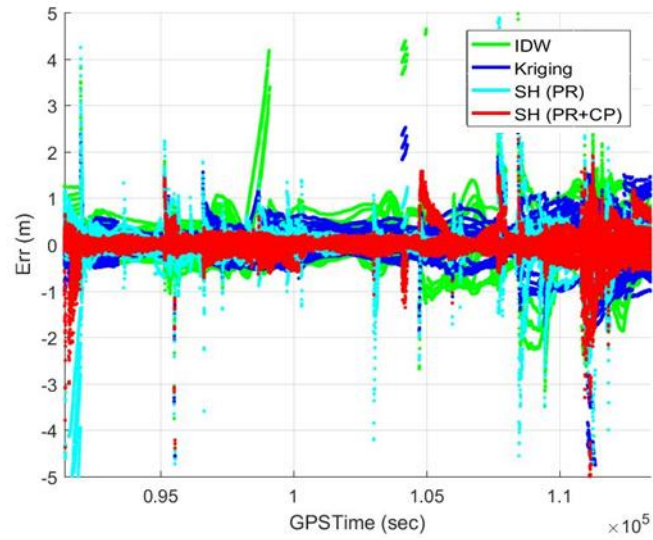


Figure 5-31 range domain ionospheric delay residual history (simulation)

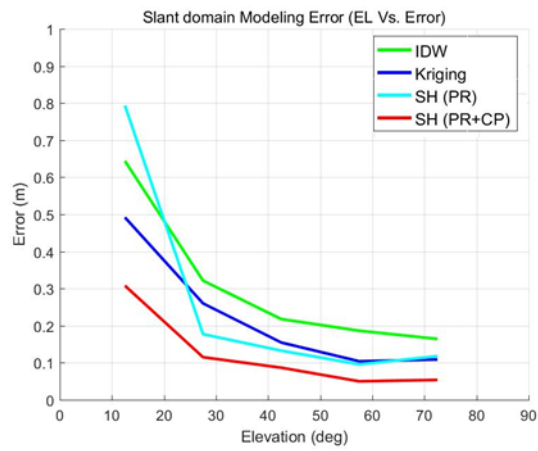


Figure 5-32 RMS of range residual error versus elevation angle (simulation)

기존의 SBAS 알고리즘인 IDW를 연두색, kriging을 파란색, 의사거리를

활용한 spherical harmonics 모델을 하늘색, 의사거리, 반송파 측정치를 활용한 spherical harmonics 모델을 빨간색으로 표시하였다. 각각의 그래프에서 제안된 기법을 활용하는 경우 전체적으로 작은 오차를 보이지만 낮은 양각에서 특히 작은 오차를 보이는 것을 확인할 수 있다.

Table 5-3 Ionospheric correction error statistics (simulation)

	95% Error (m)	99% Error
IDW	0.83	1.68
Kriging	0.75	1.29
SH (PR)	0.39	1.00
SH (PR+ CP)	0.30	0.82

전체 데이터에서 나타난 95% 오차는 IDW, kriging, 의사거리 spherical harmonics, 의사거리 및 반송파를 활용한 spherical harmonics 가 각각 0.83 m, 0.75 m, 0.39 m, 0.30 m 로 나타났으며 99% 오차는 1.68 m, 1.29 m, 1.00 m, 0.82 m 이다. 제안된 기법의 성능 향상을 더욱 잘 볼 수 있는 부분은 저양각 데이터이다. 양각이 20도 이하인 경우의 통계를 나타내면 Table 5-4와 같다.

Table 5-4 Ionospheric correction error statistics for low elevation (simulation)

	95% Error (m)	99% Error
IDW	1.14	2.10
Kriging	0.97	1.44
SH (PR)	0.56	1.52
SH (PR+ CP)	0.46	1.20

양각 20도 이하인 데이터에 대해서는 95% 오차가 각각 1.14 m, 0.97m, 0.56m, 0.46m로 나타났으며 99% 오차는 2.10 m, 1.44m, 1.52 m, 1.20 m로 나타났다. 위 결과로부터 제안된 기법이 기존 방법에 비하여 전리층 보정정보의 오차를 효과적으로 감소 시킬 수 있음을 확인하였다.

5. 실측 데이터 테스트

1) 테스트 환경

다음은 제안한 방법의 실측데이터에서의 유효성을 알아보기 위하여 수행된 테스트 결과에 대하여 분석하도록 한다. 테스트는 2014년 9월 1일과 9월 12일 오전 9시부터 오후 9시까지의 데이터를 활용하여 수행이 되었다. 테스트가 수행된 날짜의 전리층 환경은 지자계 지수 (Kp Index) 값으로부터 확인할 수 있다 [80]. 다음은 2014년 9월 각 날짜 별로 나타난 지자계 지수 값의 평균 값을 나타낸 그래프이다.

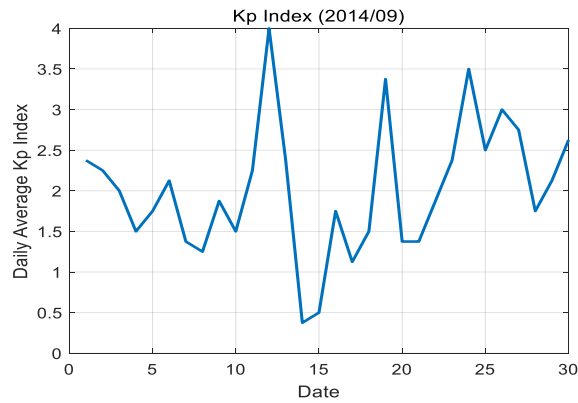


Figure 5-33 Daily average Kp Index

전리층 환경은 9월 1일의 경우 quiet 상태였으며, 9월 12일의 경우에는 9월 중 가장 전리층 활동이 활발한 active한 상태였다.

테스트에 사용된 기준국 및 사용자 배치는 아래와 같다. 시뮬레이션과 같이 사용자를 임의로 설정하지 못하기 때문에 사용자의 배치가 제한적인 것을 제외하면 시뮬레이션과 유사한 환경에서 테스트가 수행되었다. SBAS 기준국으로 사용된 기준국은 제주(1), 강화, 진주, 강릉, 세종 기준국이며 사용자로 사용된 기준국은 수원, 울진, 대구, 광주, 제주(2) 이다.

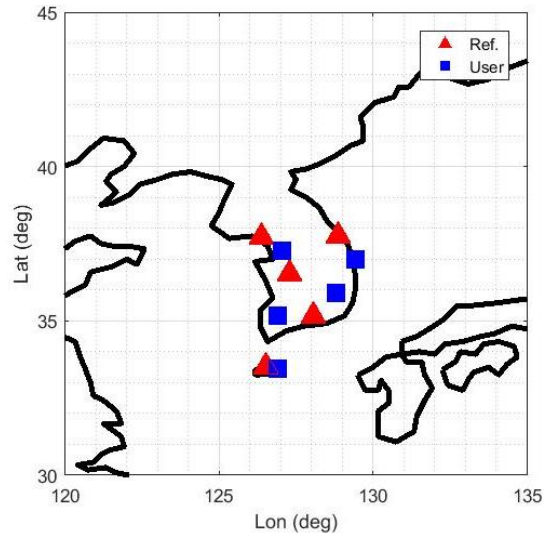


Figure 5-34 reference station and user (real data)

2) 테스트 결과

테스트 결과는 시뮬레이션과 유사하게 분석되었다. 실제 상황에서는 true 전리층 맵을 알 수 없기 때문에 전리층 지연 맵에 대한 평가가 어렵다. 따라서 실측 데이터 테스트에서는 사용자 의사거리 영역에서의 테스트와 위치 결과로 성능을 분석하였다.

① 2014.09.01. 테스트 결과

- 사용자 의사거리 영역 테스트 결과

시뮬레이션과 유사한 방법으로 사용자 의사거리에서의 보정정보 성능을

테스트하였다. 실측 데이터에서는 실제 값을 알 수 없으므로 이를 대신할 수 있는 방법을 모색해야 한다. 본 연구에서는 전리층 관련 연구에서 기준 값으로 많이 사용되고 있는 leveled carrier phase 측정치를 기준 값으로 활용하여 분석을 수행하였다 [81-84]. Figure 5-35는 실측 데이터의 전리층 보정정보 성능을 평가하는 흐름도를 나타낸 것이다.

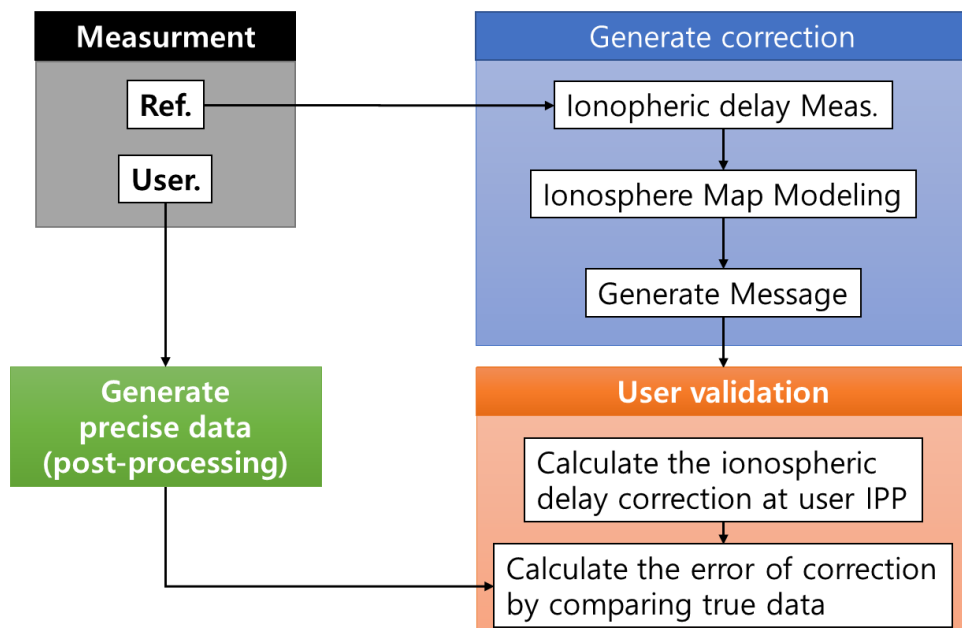


Figure 5-35 Performance evaluation method in pseudorange domain (real data)

모든 사용자의 모든 위성에 대한 보정정보 적용 후의 잔여 오차를 계산하였으며 Figure 5-36는 전체 테스트 시간 동안의 잔여 오차를 시계열로 나타낸 것이다.

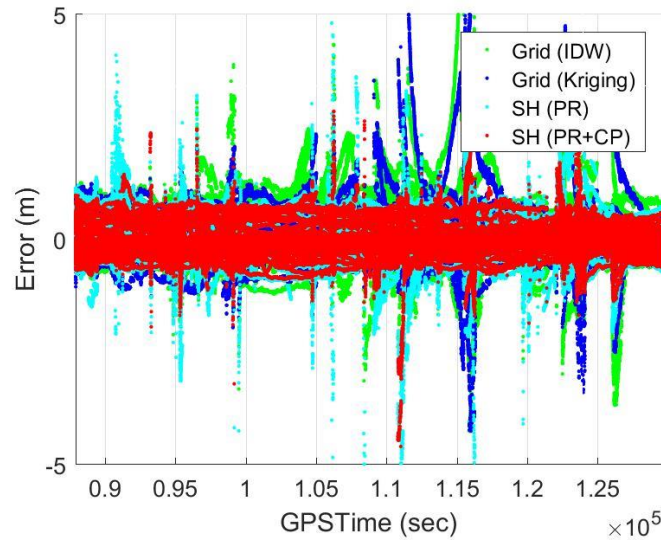


Figure 5-36 range domain ionospheric delay residual history (2014.09.01.)

시뮬레이션과 마찬가지로 기존의 SBAS 알고리즘인 IDW를 연두색, kriging을 파란색, 의사거리를 활용한 spherical harmonics 모델을 하늘색, 의사거리, 반송파 측정치를 활용한 spherical harmonics 모델을 빨간색으로 표시하였다. 위 그래프에서는 모델링 방법 각각의 성능을 확인하기에는 어려움이 존재한다. 따라서 이를 통계처리를 하고 다른 방법으로 보여주는 것이 필요하다. 본 연구에서 제안한 의사거리, 반송파 측정치를 동시에 활용하는 알고리즘에서 개선하고자 했던 부분은 기존의 알고리즘이 저양각에서 큰 오차를 보이는 것이었다. 따라서 오차를 양각에 따라서 확인해 보았으며 Figure 5-37는 각각 양각 구간 별로 RMS 오차를 계산하여 나타낸 그림이다. 10도 간격으로 양각 구간을 나누고 데이터를 모아 통계 값을 산출하고 그림으로 표현하였다.

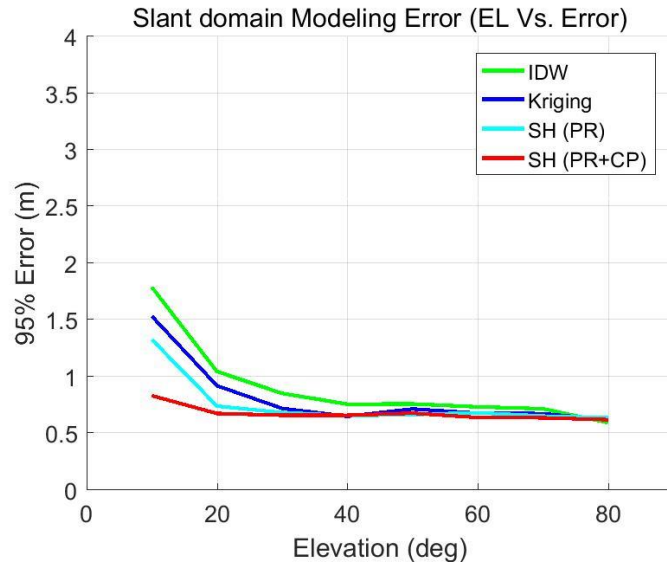


Figure 5-37 95% range residual error versus elevation angle (2014.09.01.)

높은 양각에서의 모델링 결과는 4가지 모델링 방법이 크게 차이가 나지 않는다. 그러나 낮은 양각으로 갈수록 모델링 방법간의 차이가 발생하게 된다. 의사거리만 활용하는 다른 모델링 기법들이 40도 이하의 낮은 양각으로 갈수록 오차가 급격하게 증가하는 것에 반해 제안한 방법은 낮은 양각으로 가면서 발생하는 오차의 증가량이 다른 방법에 비하여 훨씬 작은 수준임을 확인할 수 있다.

전체 오차 데이터들을 가우시안 분포로 가정하여 확률 분포를 계산할 수 있으며 4가지 기법에 대하여 나타나는 분포를 겹쳐서 나타내면 Figure 5-38와 같다.

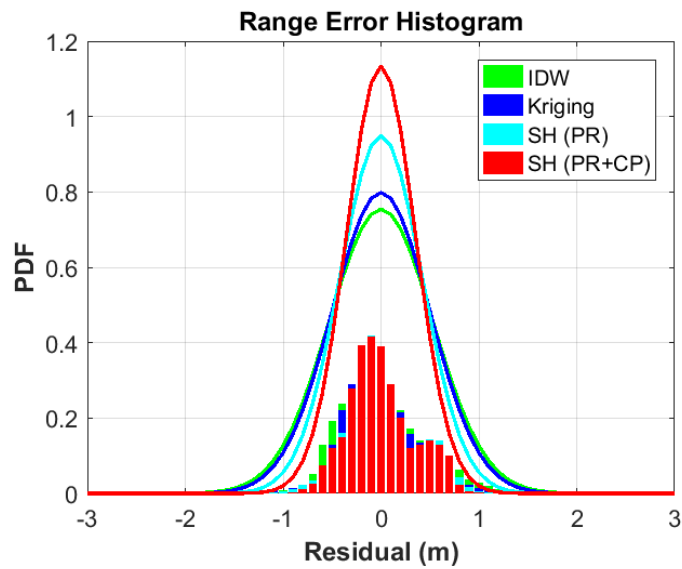


Figure 5-38 Probability distribution of range residual error (2014.09.01.)

제안된 방법이 가장 작은 오차 분포를 가지므로 나타나는 확률 분포가 0 지점에서 피크가 가장 높고 좁은 분포를 보임을 확인할 수 있다.

앞서 도시한 데이터들에 대한 통계는 Table 5-5, Table 5-6과 같다. 각각 전체 데이터, 양각이 20도보다 낮은 데이터에 대한 통계를 나타낸 표이다.

Table 5-5 Ionospheric correction error statistics (2014.09.12.)

	95% Error (m)	99% Error (m)
IDW	0.94	1.65
Kriging	0.80	1.41
SH (PR)	0.74	1.09
SH (PR+ CP)	0.67	0.82

Table 5-6 Ionospheric correction error statistics for low elevation angle
(2014.09.12.)

	95% Error (m)	99% Error (m)
IDW	1.53	2.69
Kriging	1.20	3.12
SH (PR)	1.02	2.08
SH (PR+ CP)	0.74	1.17

먼저 전체 데이터의 95% 오차에서 제안된 기법이 IDW, Kriging, 의사거리만 활용한 spherical harmonics에 대하여 각각 28%, 16%, 10% 감소하였으며 99% 오차에서는 50%, 41%, 24% 감소하였다. 제안된 기법의 효과가 더 잘 나타나는 저앙각 데이터에 대해서는 95% 오차에서 각각 51%, 38%, 27% 감소하였으며 99% 오차에서 57%, 62%, 44%가 감소하였다.

추가적으로 정확성 성능 이외에도 가용성, 무결성 성능 측면에서 미치는

영향을 분석해보기 위하여 각각을 확인할 수 있는 UIRE, 정규화된 오차 값을 계산하여 비교를 하였다. 정규화된 오차의 정의는 다음과 같다.

$$\varepsilon_{nor} = \varepsilon / 5.33\sigma_{UIRE} \quad (5-33)$$

ε : ionospheric residual error after applying correction

σ_{UIRE} : standard deviation of correction calculated from integrity message

ε_{nor} : normalized error

작은 오차 값을 보일수록 높은 정확성 성능을 가지며, UIRE 값이 작을수록 가용성 성능이 좋아질 수 있다. 작은 정규 오차 값을 가질수록 표준편차 값이 오차를 잘 bound 하고 있음을 의미하므로 무결성 성능 만족이 쉽다. 정규화된 오차 값의 경우 1보다 항상 작은 값을 보여야 하며 이를 초과할 시에는 무결성 성능의 문제를 야기할 수 있다. 가용성, 무결성 성능은 서로 trade-off의 관계에 있으므로 어느 한가지 성능을 위하여 표준 편차 값이 너무 크거나 작게 설정할 경우 다른 한가지 성능에 문제를 일으킬 수 있다. 무결성 성능은 안전과 직결되는 성능이므로 최우선적으로 만족이 되어야 하며, 이를 만족하면서 낮은 분산 값을 가지는 것이 중요하다.

이러한 가용성, 무결성 성능에 대한 지표는 Stanford plot이라고 하는 그림에서 쉽게 파악이 가능하다. Stanford plot은 항법 성능 중 무결성, 가용성 성능을 쉽게 확인할 수 있는 그림으로 성능 분석에 많이 사용된다 [85-90]. Figure 5-39은 Stanford plot의 예시를 나타낸 것이다.

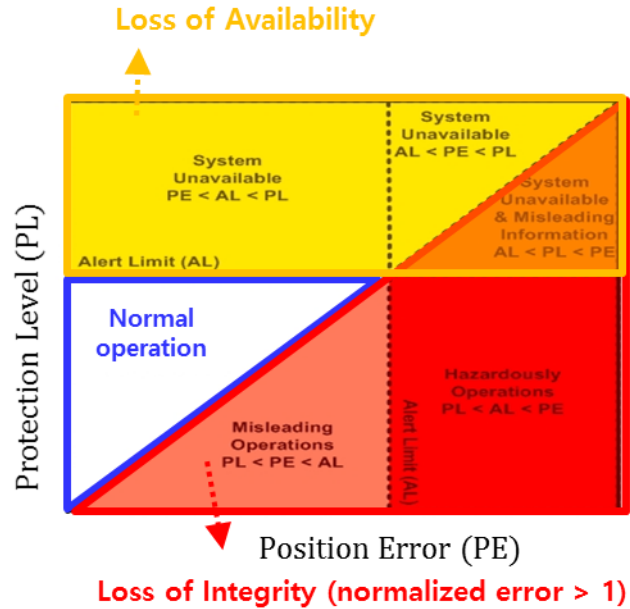


Figure 5-39 stanford plot example

X 축을 위치 오차, Y축을 보호수준으로 하여 데이터 샘플마다 해당되는 위치에 표시를 하는 방식으로 그래프를 도시한다. 그래프 상에서 대각선 아래에 해당되는 빨간색 영역은 위치 오차가 보호수준을 초과하는 영역이다. 즉, 대각선 아래에 데이터가 도시되는 경우 무결성에 문제가 발생했다고 판단된다. UIRE 값이 오차를 제대로 bound 하지 못하여 정규화된 오차 값이 1이 넘는 경우 이러한 문제가 발생할 가능성이 있다. 그래프에서 보호수준이 경보한계 값을 초과하는 노란색 영역은 가용성에 문제가 발생하는 구간이다. UIRE 값이 과도하게 크게 계산되는 경우, 계산되는 보호수준 값이 크게 나타나고 가용성에 문제가 발생할 수 있다.

Figure 5-40, Figure 5-41는 각각 정규화 된 오차 값과 σ_{UIRE} 를 나타낸 그래프이다.

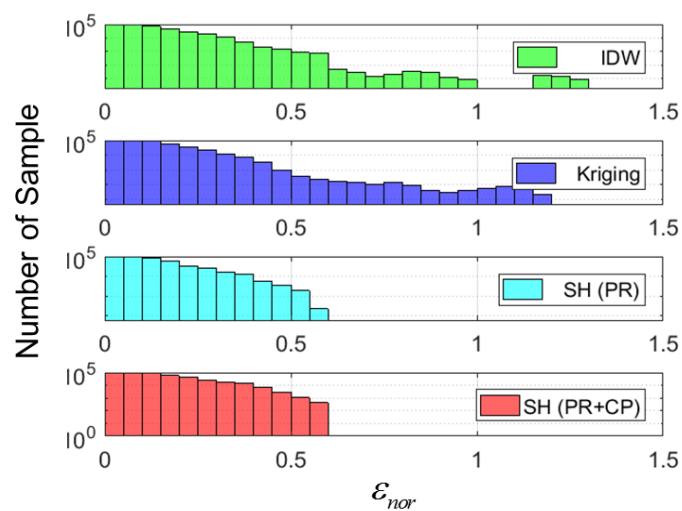


Figure 5-40 normalized residual error histogram (2014.09.01.)

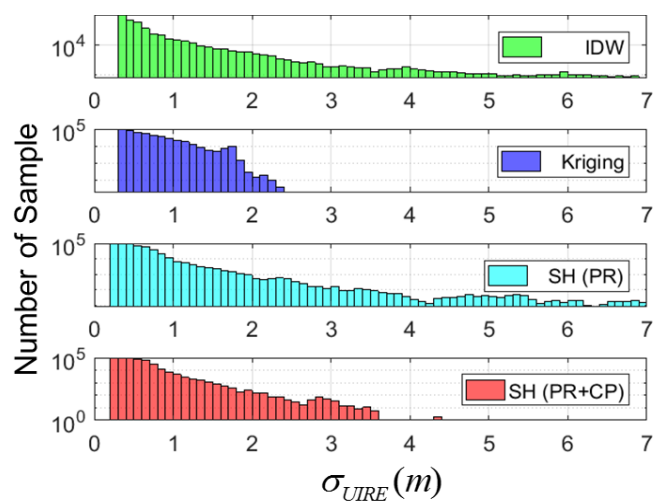


Figure 5-41 sigma UIRE histogram (2014.09.01.)

먼저 정규화된 오차 값을 살펴보면 기존의 격자 모델인 IDW, kriging에서는 값이 1을 넘는 데이터들이 존재함을 확인할 수 있다. 이는 보정정보의 외곽 영역에서 발생하는 성능 저하를 무결성 정보가 제대로 bound하지 못하여 발생한 것이다.

문제가 발생한 외곽 지역의 격자 보정 정보를 생성할 때, 격자 점의 위치 대비 한쪽 방향으로만 분포한 측정치들을 사용하여 추정을 하게 된다. 그러한 불균형한 측정치 분포에서 격자점을 추정하므로 문제가 발생하게 되는데, 이러한 측정치 분포로 인한 격자점 추정 정확도의 불확실성을 고려하기 위한 것이 전리층 위험 모델이다 [91, 92]. 측정치 분포에 따라서 발생하는 격자점 추정의 불확실성을 많은 데이터로부터 통계를 내고 이를 고려하여 보정정보의 표준편차 값을 키워줘야 한다.

본 연구에서 제안하는 기법에서는 모델에 맞는 별도의 전리층 위험 모델을 구축하지 않았지만 무결성 관련 문제가 발생하지 않았다. 물론 하루 데이터 결과만으로 무결성의 문제가 없음을 장담할 수 없으며, 실제 적용을 위해서는 제안하는 기법에서 발생할 수 있는 위험 상황을 고려하여 알고리즘을 보완해야 한다.

의사거리만 활용한 spherical harmonics 모델과 비교할 경우, 정규화된 오차 값은 둘 다 비슷한 수준의 값을 보였다. 오차 수준은 제안된 기법이 작았음에도 정규화된 오차가 비슷한 이유는 의사거리만 이용한 모델링의 결과가 오차 수준이 큰 만큼 표준 편차 값이 크게 계산이 되었기 때문이다. 즉, 의사거리만 이용한 spherical harmonics 모델링의 경우 유사한 무결성 성능을 보이지만 정확성, 가용성 측면에서는 제안된 기법대비 안 좋은 결과를 보였다.

- 사용자 위치 영역 테스트 결과

제안된 방법이 실제 SBAS 사용자에게서도 효과가 있는지를 알아보기 위하여 추가적인 테스트를 수행하였다. 5개의 기준국으로부터 전리층 보정정보 이외에도 위성 관련 오차까지 추정을 하였으며, SBAS 메시지를 생성하여 사용자에게 적용을 했다. 동일한 SBAS 위성, 대류층 보정정보를 사용할 때, 각 전리층 보정정보에 따른 성능 변화를 살펴보았다. 다음은 전체 사용자에게서 나타나는 3차원 위치 오차의 누적 오차 분포를 나타낸 그래프이다.

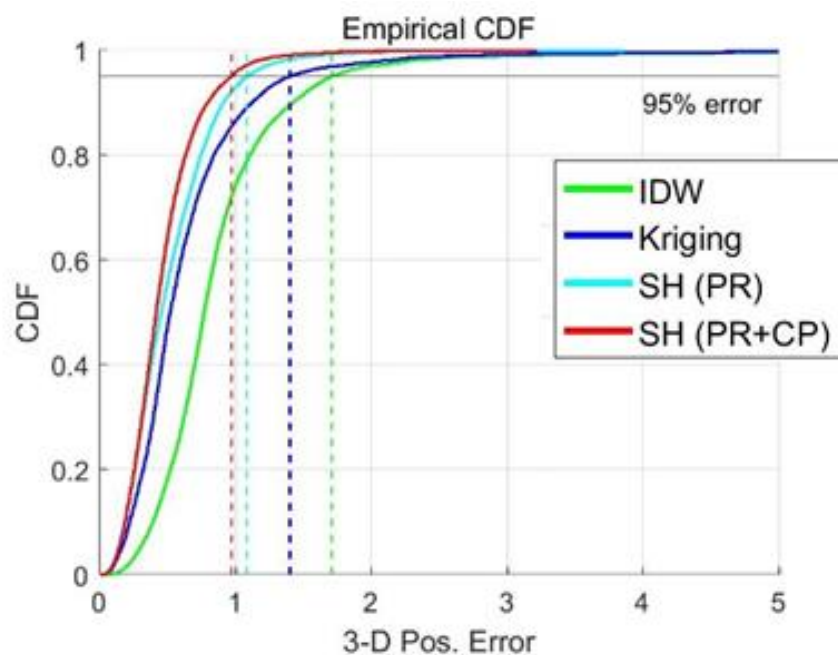


Figure 5-42 CDF of 3-d position error (2014.09.01.)

제안한 방법의 경우, 가장 작은 위치 오차 분포를 보였다. Table 5-7,

Table 5-8는 각각의 기준국에서 나타나는 오차의 95% 오차 통계를 정리한 표이다.

Table 5-7 95% position error statistics (2014.09.01.)

	SUWN	KWNJ	TEGN	WULJ	JEJU
IDW	1.47	1.19	1.33	1.38	1.93
Kriging	1.06	1.22	1.03	1.09	1.94
SH (PR)	1.04	0.86	1.01	1.25	1.85
SH (PR+ CP)	0.94	0.91	0.90	0.97	1.01

각각의 기준국 위치 결과에서 제안된 방법을 적용했을 때, 사용자의 위치 오차가 최소가 됨을 볼 수 있다. 특히 기준국 네트워크를 약간 벗어나는 대구, 제주 기준국 사용자에서 제안된 기법을 적용했을 때의 오차 수준이 상당히 감소함을 볼 수 있다. 전체 사용자의 위치 오차를 모아서 나타낸 결과에서도 제안된 기법의 성능 향상을 한번에 확인할 수 있으며, 95% 오차와 기존 방법대비 제안된 방법을 적용했을 때의 개선 효과를 나타내면 Table 5-8과 같다.

Table 5-8 Total position error statistics (2014.09.01.)

	95%	Advance
IDW	1.70	43 %

Kriging	1.40	31 %
SH (PR)	1.10	12 %
SH (PR+ CP)	0.97	-

전체 사용자 오차에 대하여 통계를 내본 결과에서 제안된 기법이 IDW, Kriging, 의사거리만 사용한 spherical harmonics 모델 대비 95% 오차에서는 각각 43%, 31%, 12%의 개선 효과가 나타났다.

② 2014.09.12. 테스트 결과

- 사용자 의사거리 영역 테스트 결과

앞서 제시한 2014년 9월 1일의 결과와 같이 2014년 9월 12일에 대해서도 사용자 의사거리, 위치 영역에서 결과를 분석하였다. Figure 5-43는 전체 테스트 시간 동안의 보정정보 적용 후의 잔여 오차를 시간에 따라 나타낸 것이다.

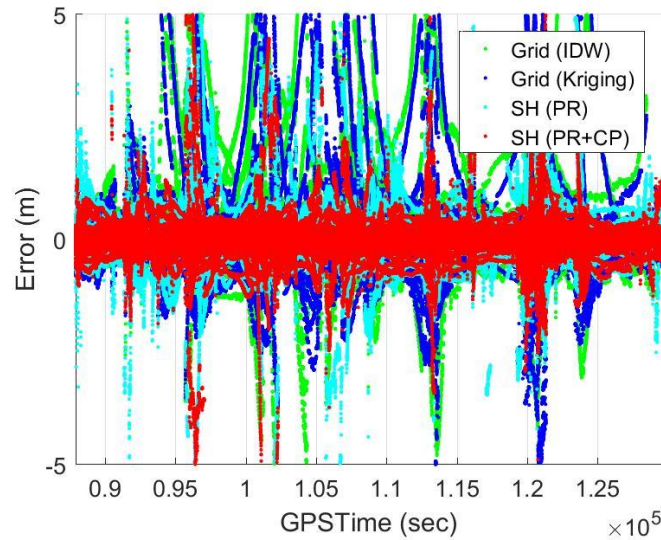


Figure 5-43 range domain ionospheric delay residual history (2014.09.12.)

기존의 SBAS 알고리즘인 IDW를 연두색, kriging을 파란색, 의사거리를 활용한 spherical harmonics 모델을 하늘색, 의사거리, 반송파 측정치를 활용한 spherical harmonics 모델을 빨간색으로 표시하였다. 전리층 활동이 강해짐에 따라서 2014년 9월 1일 대비 전체적으로 오차가 증가하는 부분이 여러 군데에서 발생하는 것을 확인할 수 있다.

Figure 5-44는 양각 구간 별로 나타나는 RMS 오차를 나타낸 그림이다.

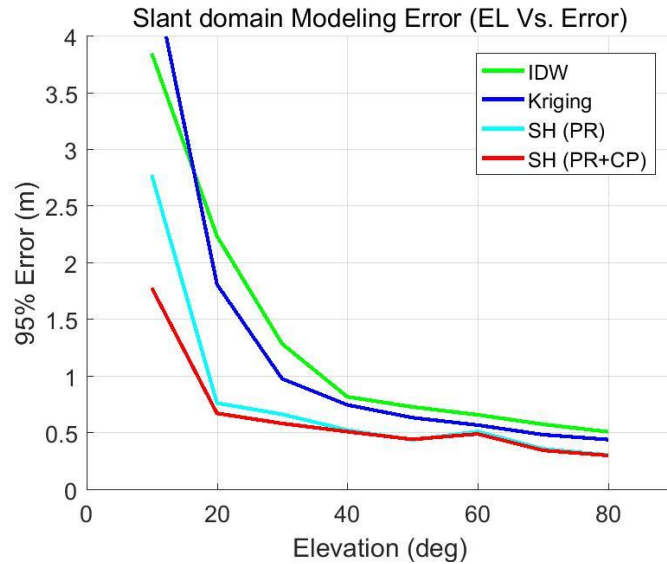


Figure 5-44 95% range residual error versus elevation angle (2014.09.12.)

2014년 9월 1일 결과와 마찬가지로 높은 양각에서의 모델링 결과는 4가지 모델링 방법이 크게 차이가 나지 않았으나 낮은 양각으로 갈수록 모델링 방법간의 차이가 발생한다. 의사거리만 활용하는 다른 모델링 기법들이 40도 이하의 낮은 양각으로 갈수록 오차가 급격하게 증가하는 것에 반해 제안한 방법은 낮은 양각으로 가면서 발생하는 오차의 증가량이 다른 방법에 비하여 훨씬 작은 수준임을 확인할 수 있다.

Figure 5-45은 전체 오차 데이터들을 가우시안 분포로 가정하여 확률 분포를 계산하여 나타낸 그림이다.

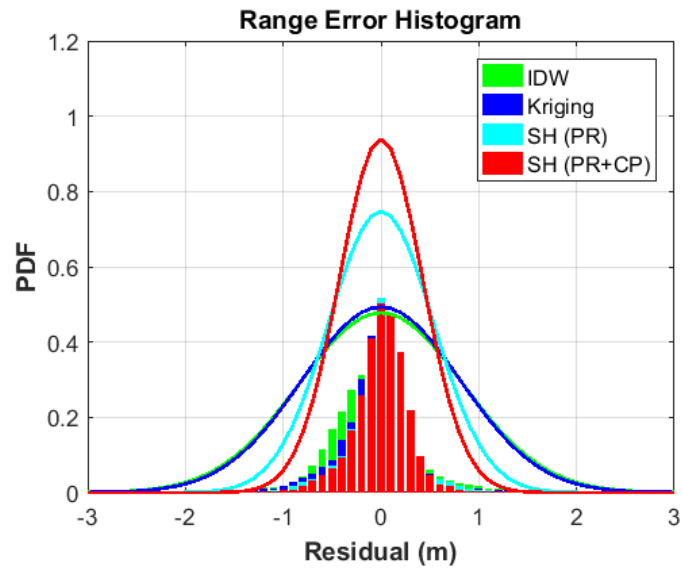


Figure 5-45 Probability distribution of range residual error (2014.09.12.)

전체 오차 분포에서도 제안된 방법이 가장 작은 오차를 보임을 확인할 수 있다. 오차 데이터들에 대한 통계는 Table 5-9, Table 5-10과 같다. 각각 전체 데이터, 양각이 20도보다 낮은 데이터에 대한 통계를 나타낸 표이다.

Table 5-9 Ionospheric correction error statistics (2014.09.12.)

	95% Error (m)	99% Error (m)
IDW	1.38	3.79
Kriging	1.31	4.07
SH (PR)	0.78	1.89
SH (PR+ CP)	0.64	1.34

Table 5-10 Ionospheric correction error statistics for low elevation angle
(2014.09.12.)

	95% Error (m)	99% Error (m)
IDW	3.60	6.49
Kriging	3.97	6.51
SH (PR)	1.85	4.81
SH (PR+ CP)	1.26	3.36

2014년 9월 1일 데이터 대비 전체적으로 증가된 통계 값을 확인할 수 있다. 전체 데이터의 95% 오차에서 제안된 기법이 IDW, Kriging, 의사거리만 활용한 spherical harmonics에 대하여 각각 54%, 51%, 18% 감소하였으며 99% 오차에서는 65%, 67%, 29% 감소하였다. 저양각 데이터에 대해서는 95% 오차에서 각각 65%, 68%, 32% 감소하였으며 99% 오차에서 48%, 48%, 30%가 감소하였다. 의사거리를 활용한 spherical harmonics 대비 개

선은 크게 변화가 없었으나, 격자 알고리즘인 IDW, Kriging 대비 개선 효과는 2014년 9월 12일 데이터에서 더 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 전리층 활동이 활발해지면서 격자 전리층 보간 과정에서 발생하는 오차가 증가하기 때문에 나타나는 결과로 판단된다.

무결성, 가용성 성능 측면에서 분석을 위한 정규화된 오차 값과 UIRE를 계산한 결과는 Figure 5-46, Figure 5-47와 같다.

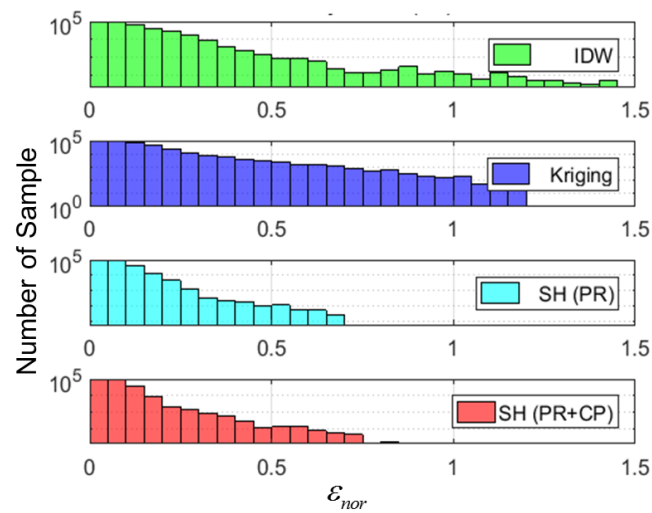


Figure 5-46 normalized residual error histogram (2014.09.12.)

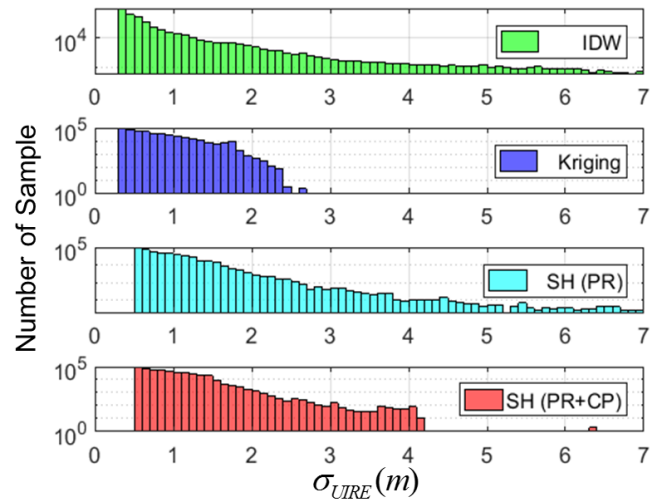


Figure 5-47 sigma UIRE histogram (2014.09.12.)

전리층 환경이 더 강해지면서 전체적으로 정규화된 오차 값이 증가했으나 모델링 기법간의 차이는 정규화된 오차와 σ_{UIRE} 값 모두 2014년 9월 1일의 결과와 유사한 경향으로 나타났다. 제안된 방법의 경우 적절한 수준의 정규화된 오차 값을 가지면서 작은 σ_{UIRE} 값을 보였다.

- 사용자 위치 영역 테스트 결과

다음은 위치 영역 테스트 결과이다. Figure 5-48은 전체 사용자에게서 나타나는 3차원 위치 오차의 누적 오차 분포를 나타낸 그래프이다.

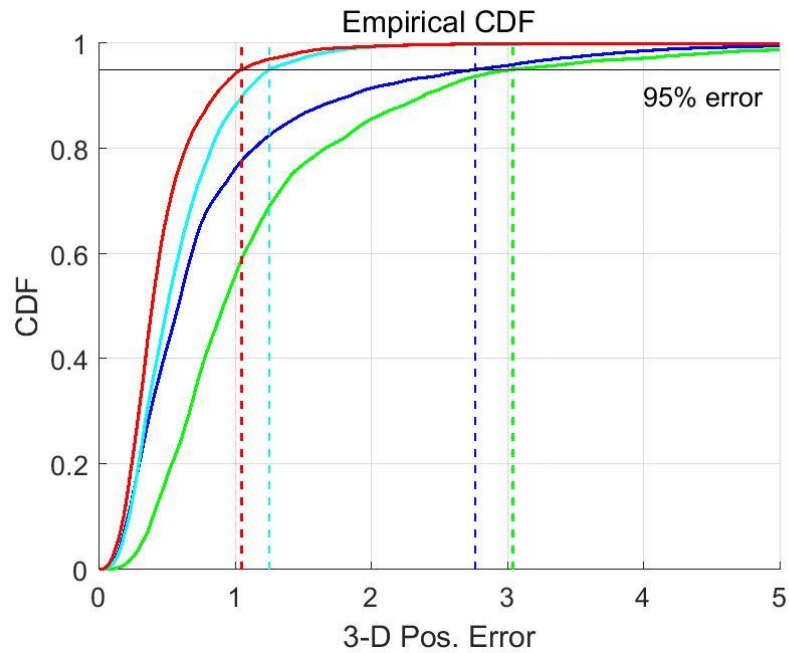


Figure 5-48 CDF of 3-d position error (2014.09.12.)

제안한 방법의 경우, 가장 작은 위치 오차 분포를 보였다. Table 5-11, Table 5-12는 각각의 기준국에서 나타나는 오차의 95% 오차 통계를 정리한 표이다.

Table 5-11 95% position error statistics (2014.09.12.)

	SUWN	KWNJ	TEGN	WULJ	JEJU
IDW	1.39	1.67	2.10	2.13	4.78
Kriging	1.13	1.64	2.05	1.51	3.96
SH (PR)	1.15	0.88	1.20	1.44	1.47
SH (PR+ CP)	1.01	0.88	1.03	1.27	1.27

각각의 기준국 위치 결과에서 제안된 방법을 적용했을 때, 사용자의 위치 오차가 최소가 됨을 볼 수 있다. 특히 기준국 네트워크를 약간 벗어나는 대구, 제주 기준국 사용자에서 제안된 기법을 적용했을 때의 오차 수준이 상당히 감소함을 볼 수 있다. 전체 사용자의 위치 오차를 모아서 나타낸 결과에서도 제안된 기법의 성능 향상을 한번에 확인할 수 있으며, 95% 오차와 기존 방법대비 제안된 방법을 적용했을 때의 개선 효과를 나타내면 Table 5-8과 같다.

Table 5-12 Total position error statistics (2014.09.12.)

	95%	Advance
IDW	3.04	65 %
Kriging	2.77	62 %
SH (PR)	1.25	16 %
SH (PR+ CP)	1.05	-

전체 사용자 오차에 대하여 통계를 내본 결과에서 제안된 기법이 IDW, Kriging, 의사거리만 사용한 spherical harmonics 모델 대비 95% 오차에서 는 각각 65%, 62%, 16%의 개선 효과가 나타났다.

6장. 결론 및 향후 과제

1. 결론

본 논문에서는 SBAS의 전리층 보정정보의 성능 향상을 위한 연구를 수행하였다. 측정치 생성 단계에서는 IFB 추정 오차로 발생하는 문제를 개선하기 위한 방법을 제시하였다. 기존 방법에서 발생하는 좁은 네트워크의 IFB 추정 성능 저하 문제 개선을 위하여 위성 IFB를 상수로 두는 기간을 여러 달까지 확장하여 추정하는 방법을 제시하였고, 그에 따라 IFB 추정 성능이 개선됨을 증명하였다. 전리층 모델링 단계에서는 의사거리 측정치가 낮은 양각에서 큰 오차를 가지는 특성으로 인하여 발생하는 외곽 영역 모델링 오차를 개선하는 알고리즘을 제시하였다. RTK와 결합을 통해 미지정수가 제거된 이중차분 반송파 측정치를 전리층 모델링에 함께 적용함으로써 외곽 영역에서 발생하는 모델링 성능 저하 문제를 개선하였다.

시뮬레이션 테스트에서는 의사거리 기반 전리층 지연 측정치만을 사용했을 때, 이중 차분 반송파 기반 전리층 지연 측정치만 사용했을 때 나타나는 특성을 확인하였다. 각각의 측정치를 사용한 결과의 문제점을 분석하고, 두 가지 측정치를 동시에 모델링에 활용할 때 얻는 성능 개선 효과를 검증하였다. 특히 기존의 SBAS 전리층 모델링 방법에 비하여 저양각 측정치들로 모델링되는 외곽 지역에서 성능 개선 효과가 크게 나타남을 확인하였다.

실측 데이터 테스트에서도 마찬가지로 제안된 방법을 적용했을 때 나타나는 성능 개선 효과를 검증하였다. 의사거리 영역 검증에서는 저양각 위성에 대하여 다른 알고리즘 대비 작은 잔여 오차, 분산 값을 보임으로써 전리층 보정정보 성능 향상을 확인하였다. 최종적으로 실제 SBAS 사용자의 위치 계산에 제안된 방법을 적용한 보정정보를 적용하여 가장 작은 오차수준을 보이는 것을 확인하였다.

2. 향후 과제

본 연구에서는 전리층 보정정보의 성능 중 정확도를 향상시키는 것에 중점적으로 연구가 수행되었다. SBAS는 안전과 직결되는 시스템으로 정확성 성능뿐만 아니라 무결성 성능이 아주 중요한 요소이다. 무결성 측면에서는 기초적인 내용을 다루었으며, 무결성 위협을 가져올 수 있는 문제들이 자세하게 분석되지 못했다. 제안된 알고리즘이 실제 적용되기 위해서는 많은 데이터를 기반으로 면밀한 분석이 요구된다.

제안된 IFB 추정 방법은 GPS 위성의 IFB 변화가 거의 없다는 가정에서 시작되었다. IFB 변화가 발생하는 경우 추정 성능에 문제가 발생할 수 있는데, 이러한 변화를 감시할 수 있는 알고리즘이 필요할 것이다.

다음으로 추정된 계수의 메시지화를 수행하는 과정에서도 개선될 여지가 존재한다. 현재 메시지 안은 간단한 방법으로 결정되었는데, degree 값을 결정하는 과정도 전리층의 활동성을 고려하여 선택할 수 있을 것이며, 추정된 계수를 메시지화 하는 부분도 조금 더 최적화를 수행하는 것이 필요할 것이다.

마지막으로 RTK를 활용하여 이중차분 반송파 측정치를 사용하게 되는데,

이때 미지정수가 정확히 풀렸다는 가정으로 모델링이 수행되었다. 실제로는 미지정수가 정확히 풀리지 않는 가능성도 존재하므로 이를 고려한 이중차분 반응과 기반의 전리층 지연 측정치 분산 값 설정 및 무결성 정보 생성이 필요하다.

Abstract

A Study on Improving the Accuracy of SBAS Ionosphere Correction by Applying Double- difference Carrier Phase Measurements

Deokhwa Han

School of Mechanical and Aerospace Engineering

The Graduate School

Seoul National University

GPS has been used in many application, and recently it has also been used for precise approach of aircraft. The differential GPS are being developed to provide high navigation performance that meets these needs. Among them, SBAS is a system which improves user navigation performance by providing correction and integrity information on GPS satellite error and ionospheric delay error.

The biggest error factor that degrades the navigation performance of SBAS users is ionospheric delay error. The influence of this error is more evident in active ionosphere environment. Since the residual error of several meters or more may occurs even after applying the SBAS ionospheric correction, it is necessary to accurately correct the ionospheric delay error to improve the navigation performance of SBAS user.

In this paper, to improve the performance of the SBAS ionospheric correction, we have carried out studies to improve IFB estimation and ionospheric modeling.

The IFB is a bias error that occurs when extracting the ionospheric delay from the GPS measurements and it must be compensated to provide precise ionospheric correction. A broad reference station network is advantageous for IFB estimation. IFB estimation accuracy is degraded in a regional reference station network like Korea. In this paper, the cause of the degradation is analyzed. It was verified that the IFB estimation performance in a regional reference station network can be improved by extending the period that the IFB is assumed to be constant.

In the conventional pseudorange based ionospheric modeling method, performance degradation occurs in the outer area. Not only the number of measurement is small, but also a large measurement error occurs in the outer region, thereby degrading the performance of correction. In this study, we developed a new ionospheric modeling algorithm that utilizes double-difference carrier phase measurements to overcome these problems. The double-difference ionospheric delay measurement from RTK, have a much more precise characteristic than the pseudorange measurement. The proposed algorithm improves the modeling performance in the outer region of ionospheric correction by using pseudorange and double-difference carrier phase measurement in a modeling process.

In order to evaluate the performance of the proposed algorithm, test

was carried out using five reference station in South Korea. The preprocessing, IFB compensation, ionosphere modeling, message generation, and SBAS navigation algorithm were implemented to evaluate the performance of the proposed algorithm. The results were compared with existing SBAS ionospheric correction algorithm such as IDW and Kriging to verify the performance improvement. In the range domain analysis, it was verified that the performance of correction for low elevation satellite improved significantly. Also, it was verified that the position error of SBAS user can be reduced compared to conventional method.

Keywords : GPS, SBAS, Ionosphere, double-difference carrier phase,
Inter-frequency bias

Student Number : 2011-20767

참고 문헌

- [1] P. Misra and P. Enge, "Global Positioning System: signals, measurements and performance second edition," *Massachusetts: Ganga-Jamuna Press*, 2006.
- [2] E. Kaplan and C. Hegarty, *Understanding GPS: principles and applications*. Artech house, 2005.
- [3] P. W. Bradford, J. Spilker, and P. Enge, "Global positioning system: theory and applications," *AIAA Washington DC*, vol. 109, 1996.
- [4] A. Fellner, K. Banaszek, and P. Trominski, "The Implementation of the EGNOS System to APV-I Precision Approach Operations," 2010.
- [5] K. Rao, "GAGAN-The Indian satellite based augmentation system," *84.40. Ua*, 2007.
- [6] Y.-F. Tsai and K.-S. Low, "Performance assessment on expanding SBAS service areas of GAGAN and MSAS to Singapore region," in *Position, Location and Navigation Symposium-PLANS 2014, 2014 IEEE/ION*, 2014, pp. 686-691: IEEE.
- [7] T. Walter, J. Blanch, and P. Enge, "Coverage improvement for dual frequency SBAS," *Proceedings of ION ITM*, vol. 2010, 2010.
- [8] H. Yun, D. Han, and C. Kee, "A Preliminary Study of Korean Dual-Frequency SBAS," *Journal of Positioning, Navigation, and Timing*, vol. 3, no. 1, pp. 11-16, 2014.
- [9] D.-H. Han, H. Yun, C.-W. Kim, O. Kim, and C.-D. Kee, "Performance Verification of Psudolite-based Augmentation System Using RF signal logger and broadcaster," *Journal of Navigation and Port Research*, vol. 38, no. 4, pp. 391-397, 2014.
- [10] Y. Yun, "An Analysis of Reference Station Distribution Impact on KASS UDRE Performance," *The Journal of Advanced Navigation Technology*, vol. 19, no. 3, pp. 207-216, 2015.
- [11] S. Choy, J. Kuckartz, A. G. Dempster, C. Rizos, and M. Higgins, "GNSS satellite-based augmentation systems for Australia," *GPS Solutions*, vol. 21, no. 3, pp. 835-848, 2017.
- [12] M. Hernández-Pajares, J. M. Juan, J. Sanz, R. Orus, A. Garcia-Rigo, J. Feltens, A. Komjathy, S. C. Schear, A. Krankowki, "The IGS VTEC maps: a reliable source of ionospheric information since 1998," *Journal of Geodesy*, vol. 83, no. 3-4, pp. 263-275, 2009.

- [13] M. Hernández-Pajares, J. M. Juan, J. Sanz, A. Aragon-Angel, A. Garcia-Rigo, D. Salazar, M. Escudero, "The Ionosphere: effects, GPS modeling and the benefits for space geodetic techniques," *Journal of Geodesy*, vol. 85, no. 12, pp. 887–907, 2011.
- [14] S. Schaer; and W. Gurtner, "IONEX: The IONosphere Map EXchange Format Version 1," 1998.
- [15] D. Kim, "A Study on correction generation algorithms for wide area differential GNSS," Ph. d. thesis, Seoul national university, 2007.
- [16] K.-H. Sohn and C.-D. Kee, "Ionospheric Modeling using Wavelet for WADGPS," *The Journal of Advanced Navigation Technology*, vol. 11, no. 4, pp. 371–377, 2007.
- [17] S. Sunda, S. M. Regar, S. Shrivastava, R. Acharya, P. Khekale, and M. Sivaraman, "TEC estimation and its validation for real time implementation of satellite navigation in GAGAN," in *Proceedings of the 2007 National Technical Meeting of The Institute of Navigation*, 2001, pp. 1050–1055.
- [18] Y. Gao, F. Lahaye, P. Heroux, X. Liao, N. Beck, and M. Olynik, "Modeling and estimation of C1-P1 bias in GPS receivers," (in English), *Journal of Geodesy*, vol. 74, no. 9, pp. 621–626, Jan 2001.
- [19] J.-C. Xue, S.-L. Song, W.-Y. Zhu, and X.-S. Lu, "A Study on the Reliability of the Ionospheric VTEC and Satellite DCB Derived from a Regional GPS Network," *Chinese Astronomy and Astrophysics*, vol. 36, no. 1, pp. 73–85, 2012.
- [20] R. Hatch, "The synergism of GPS code and carrier measurements," in *International geodetic symposium on satellite doppler positioning*, 1983, pp. 1213–1231.
- [21] Chao, "Real time implementation of the wide area augmentation system for the global positioning system with an emphasis on ionospheric modeling," Thesis 1997.
- [22] S. Schaer, G. Beutler, L. Mervart, and M. Rothacher, "GLOBAL AND REGIONAL IONOSPHERE MODELS USING THE GPS DOUBLE DIFFERENCE PHASE OBSERVABLE," 1995.
- [23] X. Liao, *Carrier phase based ionosphere recovery over a regional area GPS network*. University of Calgary, 2001.
- [24] F. Arikan, H. Nayir, U. Sezen, and O. Arikan, "Estimation of single station interfrequency receiver bias using GPS-TEC," *Radio Science*, vol. 43, no. 4, pp. n/a–n/a, 2008.

- [25] G. Ma and T. Maruyama, "Derivation of TEC and estimation of instrumental biases from GEONET in Japan," (in English), *Annales Geophysicae*, vol. 21, no. 10, pp. 2083–2093, Oct 2003.
- [26] G. Y. Ma, W. Gao, J. H. Li, Y. H. Chen, and H. Shen, "Estimation of GPS instrumental biases from small scale network," (in English), *Advances in Space Research*, vol. 54, no. 5, pp. 871–882, Sep 1 2014.
- [27] S. Kao, Y. Chen, and F. Ning, "A MARS-based method for estimating regional 2-D ionospheric VTEC and receiver differential code bias," *Advances in Space Research*, vol. 53, no. 2, pp. 190–200, 2014.
- [28] L. X. Li, D. H. Zhang, S. R. Zhang, A. J. Coster, Y. Q. Hao, and Z. Xiao, "Influences of the day-night differences of ionospheric variability on the estimation of GPS differential code bias," (in English), *Radio Science*, vol. 50, no. 4, pp. 339–353, Apr 2015.
- [29] E. Sardon and N. Zarraoa, "Estimation of total electron content using GPS data: How stable are the differential satellite and receiver instrumental biases?," (in English), *Radio Science*, vol. 32, no. 5, pp. 1899–1910, Sep–Oct 1997.
- [30] J. Zhong, J. Lei, X. Dou, and X. Yue, "Is the long-term variation of the estimated GPS differential code biases associated with ionospheric variability?," *GPS Solutions*, vol. 20, no. 3, pp. 313–319, 2015.
- [31] J. X. Shuli Song, Zhengbiao Zou, "The Stability Analysis of GNSS Satellite DCB," 2016.
- [32] L. Heng, G. X. Gao, T. Walter, and P. Enge, "Statistical characterization of GPS signal-in-space errors," in *Proceedings of the 2011 International Technical Meeting of the Institute of Navigation (ION ITM 2011)*, San Diego, CA, 2011, pp. 312–319.
- [33] D. L. Warren and J. F. Raquet, "Broadcast vs. precise GPS ephemerides: a historical perspective," *Gps Solutions*, vol. 7, no. 3, pp. 151–156, 2003.
- [34] G. X. Gao, H. Tang, J. Blanch, J. Lee, T. Walter, and P. Enge, "Methodology and case studies of signal-in-space error calculation top-down meets bottom-up," in *Proceedings of the 22nd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2009)*, 2001, pp. 2824–2831.
- [35] A. J. Hansen, *Tomographic estimation of the ionosphere using terrestrial GPS sensors*. 2002.

- [36] Y. Gao and Z. Z. Liu, "Precise Ionosphere Modeling Using Regional GPS Network Data," *Journal of Global Positioning Systems*, vol. 1, no. 1, pp. 18–24, 2002.
- [37] Z. Q. Tu Rui, Huang Guanwen and Zhao Hong, "On ionosphere-delay processing methods for single-frequency precise-point positioning," *Geodesy and Geodynamics*, vol. 2, no. 1, pp. 71–76, 2011.
- [38] M. M. Hoque and N. Jakowski, "Mitigation of ionospheric mapping function error," 2013.
- [39] M. Hoque, N. Jakowski, and J. Berdermann, "A new approach for mitigating ionospheric mapping function errors," 2014.
- [40] J. A. Klobuchar, "Design and characteristics of the GPS ionospheric time delay algorithm for single frequency users," in *PLANS'86-Position Location and Navigation Symposium*, 1986, pp. 280–286.
- [41] R. SC159, "DO 229D: "Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System," *Wide Area Augmentation System Airborne Equipment*, 2006.
- [42] R. Nee, "The multipath estimating delay lock loop," in *Proceedings of the IEEE 2nd international symposium on spread spectrum techniques and applications*, 1992, pp. 39–42.
- [43] R. D. Van Nee, J. Siereveld, P. C. Fenton, and B. R. Townsend, "The multipath estimating delay lock loop: approaching theoretical accuracy limits," in *Position Location and Navigation Symposium, 1994., IEEE*, 1994, pp. 246–251: IEEE.
- [44] K. Shallberg, "WAAS Measurement Processing, Reducing the Effects of Multipath."
- [45] Y. Zhang and C. Bartone, "Real-time multipath mitigation with WaveSmoothTM technique using wavelets," in *Proceedings of the 17th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2004)*, 2001, pp. 1181–1194.
- [46] J. Vermeij, A. van den Berg, R. Farnworth, and E. Breeuwer, "Analysis and validation of GNSS performance," 1999.
- [47] I. SARPS, "Annex 10: international standards and recommended practices: aeronautical telecommunications," *International Civil Aviation Organisation, Montreal*, 2004.
- [48] B. Roturier, E. Chatre, and J. Ventura-Traveset, "The SBAS integrity concept standardised by ICAO-application to EGNOS,"

NAVIGATION-PARIS-, vol. 49, pp. 65-77, 2001.

[49] P. Enge, T. Walter, S. Pullen, C. Kee, Y.-C. Chao, and Y.-J. Tsai, "Wide area augmentation of the global positioning system," *Proceedings of the IEEE*, vol. 84, no. 8, pp. 1063-1088, 1996.

[50] R. Alkan, H. Karaman, and M. Sahin, "GPS, GALILEO and GLONASS satellite navigation systems & GPS modernization," in *Recent Advances in Space Technologies, 2005. RAST 2005. Proceedings of 2nd International Conference on*, 2005, pp. 390-394: IEEE.

[51] Gao, "Session on Calibration and Future Receiver Developments," 2008.

[52] Kee, "Quality Control Algorithms on WAAS Wide-Area Reference Stations," 1997.

[53] D.-H. Han, H. Yoon, and C.-D. Kee, "Modeling of GPS measurement noise for estimating smoothed pseudorange and ionospheric delay," *The Journal of Advanced Navigation Technology*, vol. 16, no. 4, pp. 602-610, 2012.

[54] S. Schaer, "Biases in GNSS Analysis," 2010.

[55] T. Walter, A. Hansen, J. Blanch, P. Enge, T. Mannucci, X. Pi, L. Sparks, B. Iijima, B. El-Arini, R. Lejeune, "Robust Detection of Ionospheric Irregularities," *Navigation*, vol. 48, no. 2, pp. 89-100, 2001.

[56] J. Blanch, "An Ionosphere Estimation Algorithm for WAAS Based on Kriging " *Proceedings of the 15th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 2002)*, Portland, OR, September 2002, pp. 816-823, 2002.

[57] J. Blanch, "Using Kriging to bound satellite ranging errors due to the ionosphere," *PhD Thesis. Stanford University*, 2003.

[58] A.J.Mannucci, "GPS and Ionosphere," *None*, 1999.

[59] Y. Moon, *Evaluation of 2-dimensional ionosphere models for national and regional GPS networks in Canada*. University of Calgary, Department of Geomatics Engineering, 2004.

[60] D. V. Ratnam, C. Sujatha, A. Sarma, and S. Ravindran, "Modelling of GAGAN TEC data using spherical harmonic functions," in *Computers and Devices for Communication, 2009. CODEC 2009. 4th International Conference on*, 2009, pp. 1-4: IEEE.

[61] L. Sparks, J. Blanch, and N. Pandya, "Estimating ionospheric delay using kriging: 1. Methodology," *Radio Science*, vol. 46, no. 6, 2011.

[62] L. Sparks, J. Blanch, and N. Pandya, "Kriging as a means of

improving WAAS availability," 2010.

[63] B. D. Tapley, S. Bettadpur, M. Watkins, and C. Reigber, "The gravity recovery and climate experiment: Mission overview and early results," *Geophysical Research Letters*, vol. 31, no. 9, 2004.

[64] R. Jin, S. Jin, and G. Feng, "M_DCB: Matlab code for estimating GNSS satellite and receiver differential code biases," *GPS Solutions*, vol. 16, no. 4, pp. 541–548, 2012.

[65] Choi, "Comparison of GPS receiver DCB estimation methods using a GPS network," *Earth, Planets and Space*, vol. 65, no. 7, pp. 707–711, 2013.

[66] B. K. Choi, J. H. Cho, and S. J. Lee, "Estimation and analysis of GPS receiver differential code biases using KGN in Korean Peninsula," *Advances in Space Research*, vol. 47, no. 9, pp. 1590–1599, 2011.

[67] B.-K. Choi, J.-K. Chung, and J.-H. Cho, "Receiver DCB Estimation and Analysis by Types of GPS Receiver," *Journal of Astronomy and Space Sciences*, vol. 27, no. 2, pp. 123–128, 2010.

[68] J. Feltens; and S. Schaer, "IGS PRODUCTS FOR THE IONOSPHERE," 1998.

[69] S. Schaer and P. Steigenberger, "Determination and use of GPS differential code bias values," in *IGS Workshop*, 2006, pp. 8–11.

[70] A. Hauschild, "Correlator- and Front-End-Dependency of GNSS Pseudorange Biases for Geodetic Receivers," 2015.

[71] A. Hauschild, "The Effect of Correlator and Front-End Design on GNSS Pseudorange Biases for Geodetic Receivers," 2015.

[72] A. Hauschild and O. Montenbruck, "A study on the dependency of GNSS pseudorange biases on correlator spacing," (in English), *Gps Solutions*, vol. 20, no. 2, pp. 159–171, Apr 2016.

[73] IGS, "IGS Network," <http://www.igs.org/network>, 2017.

[74] L. Wanninger, H. Sumaya, and S. Beer, "Group delay variations of GPS transmitting and receiving antennas," *Journal of Geodesy*, pp. 1–18, 2017.

[75] M. Durmaz and M. O. Karslioglu, "Regional vertical total electron content (VTEC) modeling together with satellite and receiver differential code biases (DCBs) using semi-parametric multivariate adaptive regression B-splines (SP-BMARS)," (in English), *Journal of Geodesy*, vol. 89, no. 4, pp. 347–360, Apr 2015.

[76] S. Kao, Y. Tu, W. Chen, D. J. Weng, and S. Y. Ji, "Factors

affecting the estimation of GPS receiver instrumental biases," *Survey Review*, vol. 45, no. 328, pp. 59–67, 2013.

[77] Y.-J. Tsai, "Wide area differential operation of the global positioning system: Ephemeris and clock algorithms," stanford university, 1999.

[78] J. Blanch, T. Walter, and P. Enge, "Application of spatial statistics to ionosphere estimation for WAAS," in *proceedings of ION NTM*, 2002, vol. 10, no. 2002, pp. 24–40.

[79] L. Sparks, A. Komjathy, and A. Mannucci, "Sudden ionospheric delay decorrelation and its impact on the Wide Area Augmentation System (WAAS)," *Radio Science*, vol. 39, no. 1, 2004.

[80] S. Skone, R. Yousuf, and A. Coster, "Performance evaluation of the wide area augmentation system for ionospheric storm events," *Positioning*, vol. 1, no. 08, p. 0, 2004.

[81] L. Ciruolo, F. Azpilicueta, C. Brunini, A. Meza, and S. Radicella, "Calibration errors on experimental slant total electron content (TEC) determined with GPS," *Journal of Geodesy*, vol. 81, no. 2, pp. 111–120, 2007.

[82] Y. Xiang, Y. Gao, J. Shi, and C. Xu, "Carrier phase-based ionospheric observables using PPP models," *Geodesy and Geodynamics*, vol. 8, no. 1, pp. 17–23, 2017.

[83] Y. Norsuzila, M. Abdullah, and M. Ismail, "Leveling Process of Total Electron Content(TEC) Using Malaysian Global Positioning System(GPS) Data," *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 1, no. 3, 2008.

[84] S. Jung and J. Lee, "Long-term ionospheric anomaly monitoring for ground based augmentation systems," *Radio Science*, vol. 47, no. 4, 2012.

[85] H. Kannemans, "An integrity, availability and continuity test method for EGNOS/WAAS," 2006.

[86] A. Simsky and F. Boon, "Galileo Integrity Concept–user level," *The Technical University of Munich, Septentrio, Munich*, 2010.

[87] P. Kovář, J. Špaček, L. Seidl, and P. Puričér, "Monitoring Station for GNSS and SBAS," in *Proceedings of TimeNav 07, ENC–GNSS–European Navigation Conference*, 2007, pp. 150–155.

[88] W. Werner, I. Deuster, and F. A. Fernandez, "Integrity Testcase Experimentation Results Within GSTB–V1," in *Proceedings of the 17th*

International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS'04), 2004.

[89] N. Caccioppoli, A. Pacifico, and V. Nastro, "MARKAB: A Toolset to Analyze EGNOS SBAS Signal in Space for Civil Aviation," *Satellite Communications and Navigation Systems*, pp. 401–415, 2008.

[90] M. Pfleger and J. Špaček, "Real-time EGNOS monitoring," in *ELMAR, 2010 PROCEEDINGS*, 2010, pp. 425–428: IEEE.

[91] T. Walter, P. Enge, and B. DeCleene, "Integrity Lessons from the WAAS Integrity Performance Panel," in *Global Navigation Satellite Systems: Report of a Joint Workshop of the National Academy of Engineering and the Chinese Academy of Engineering*, 2012, p. 207: National Academies Press.

[92] S. Datta-Barua, "Ionospheric threats to space-based augmentation system development," in *Proc. ION GNSS 2004*, 2004, pp. 21–24.